

LA FORMATION DU SÉDIMENT CALCAIRE DU LAC DE NEUCHÂTEL

Etude chimico-physique

THÈSE

présentée à la Faculté des Sciences de l'Université de Neuchâtel
pour obtenir le grade de docteur ès sciences

par

CLAUDE PORTNER

Ingénieur chimiste diplômé

1 9 5 1

IMPRIMERIE E. BIRKHÄUSER & CIE S.A., BALE

LA FORMATION DU SÉDIMENT CALCAIRE
DU LAC DE NEUCHÂTEL

Etude chimico-physique



La Faculté des Sciences de l'Université de Neuchâtel, sur
le rapport de Messieurs les professeurs E. WEGMANN, Ch.-G.
BOISSONNAS et H. LAGOTALA, autorise l'impression de la présente
thèse intitulée:

La formation du sédiment calcaire du lac de Neuchâtel

sans exprimer d'opinion sur les propositions qui y sont contenues.

Neuchâtel, le 19 mars 1951.

Le Doyen:

F. FIALA



TABLE DES MATIÈRES

Introduction	5
Quelques définitions	8

Première partie

Détermination du poids de carbonate précipité annuellement dans le lac de Neuchâtel et de l'épaisseur du dépôt annuel	10
1. Identification des couches annuelles	13
2. Précipitation activée du CO_3Ca sur la « Motte »	13
a) Détermination de l'épaisseur moyenne du dépôt annuel du sédiment à grains grossiers	14
b) Calcul de l'épaisseur moyenne du dépôt annuel du sédiment à grains fins	15
3. Méthode du bilan. Détermination de la quantité totale des carbonates précipités annuellement dans le lac	16
a) Débits des affluents	17
b) Dureté temporaire de l'eau des affluents	18
c) Influence des rives sur la dureté de l'eau du lac	20
d) Calcul du poids de carbonate précipité annuellement	21
e) Estimation de l'épaisseur du dépôt annuel de la vase calcaire sur le fond du lac	23
f) Estimation de la quantité de matières en suspension apportées par les affluents	24
4. Estimation de l'épaisseur du dépôt annuel basé sur la décalcification de l'épilimnion pendant l'été	25
a) Calcul de la décalcification de l'eau du lac du mois de mars au mois de septembre	26
b) Détermination du poids de carbonate apporté et sorti du lac par les affluents et l'émissaire, du mois de mars au mois de septembre	27
5. Comparaison des épaisseurs des dépôts annuels	28

Deuxième partie

Mécanisme de la précipitation du carbonate de calcium	29
1. Données bibliographiques sur la thermique d'un lac et les analyses chimiques de l'eau du lac de Neuchâtel	33
a) Thermique d'un lac	34
b) Analyses chimiques de l'eau du lac de Neuchâtel	38
2. Partie expérimentale. Mesure de la température et analyses chimiques de l'eau	38

a) Mesure de la température	39
b) Dosage de la dureté temporaire	39
c) Dosage du carbonate en suspension	41
d) Dosage du gaz carbonique libre	42
e) Matière organique	43
3. Variation en fonction de la profondeur de la température et de la concentration des différents constituants de l'eau du lac	43
a) Variation de la température en fonction de la profondeur	45
b) Dureté temporaire en fonction de la profondeur	45
c) Gaz carbonique en fonction de la profondeur	50
d) Matière organique en fonction de la profondeur	51
e) CO_3Ca en suspension en fonction de la profondeur	51
4. Température et concentrations des corps contenus dans l'eau du lac, en fonction du temps	52
5. Relation entre la teneur totale en matière organique et la dureté temporaire, ainsi que la teneur en carbonate en suspension	53
6. Etude du système $\text{CO}_2 - (\text{CO}_3\text{H})_2\text{Ca} - \text{CO}_3\text{Ca}$ d'après les analyses d'eau du lac de Neuchâtel	59
a) Relation entre la température et la dureté temporaire et la teneur en CO_2	59
b) Correspondance entre la température et la dureté temporaire de l'eau du lac	60
c) Correspondance entre la température et la teneur en CO_2	65
d) Relation entre la teneur en CO_2 , la dureté temporaire et la concentration du carbonate en suspension	67
7. Conclusions sur le mécanisme de la précipitation du carbonate de calcium	72

Troisième partie

Sédiments calcaires	74
1. Formation des sédiments	74
2. Analyses des sédiments	77
a) Analyses chimiques	78
b) Analyses granulométriques	80
3. Phosphore dans les sédiments	81
4. Craie lacustre de Cerlier	83
5. Généralités sur la formation des sédiments lacustres	84
Bibliographie	88

INTRODUCTION

Il nous a paru intéressant, d'une part, de déterminer le mécanisme de la précipitation du carbonate de calcium dans le lac de Neuchâtel dont l'étude est facilitée par l'absence dans l'eau fournie par les affluents d'une quantité importante de matériel en suspension; d'autre part, la valeur de l'épaisseur du dépôt annuel de vase a été estimée par différentes méthodes. Nous avons en outre étudié quelques propriétés des sédiments calcaires.

Les coordonnées du centre de figure du lac de Neuchâtel sont:

46° 55' de latitude Nord,
6° 50' de Greenwich.

Ce lac est situé en bordure interne du Jura et est orienté parallèlement à la chaîne. Il est bordé du côté nord-ouest par le Jura sur une distance d'environ 13 km. Les contreforts extrêmes de la chaîne sont baignés par les eaux du lac (A. QUARTIER, 1947, p. 20). Le relief est beaucoup moins accentué au sud-est puisque le lac touche de ce côté le pays molassique (pied des falaises). Le niveau moyen du lac, après la correction des eaux du Jura, a la cote de 429,3 m (A. QUARTIER, 1948, p. 142); les cotes sont rapportées à R.P.N. = 373,6. Ce niveau a varié dans le cours de l'histoire du lac. L'étude très soignée de W. LÜDI (1935, p. 252) a montré qu'il a été tantôt supérieur, tantôt inférieur au niveau actuel.

Les vents les plus fréquents sont ceux du nord-est et ceux du sud-ouest (ED. GUYOT et J. PERRENOUD, 1949, p. 116). Ils soufflent donc dans le sens de la longueur du lac.

Tableau 1

Les dimensions du lac de Neuchâtel

Longueur	37,7 km
Largeur maximum	8,1 km
Largeur moyenne	5,7 km
Superficie	217 km ²
(courbe hypsométrique, figure 1) .	
Profondeur maximum	153 m
Volume	14,2 km ³
Périmètre	89 km

La forme du lac est celle d'un rectangle. Son relief immergé est caractérisé par la présence d'un monticule, appelé «La Motte», dont le sommet est situé au milieu du lac.

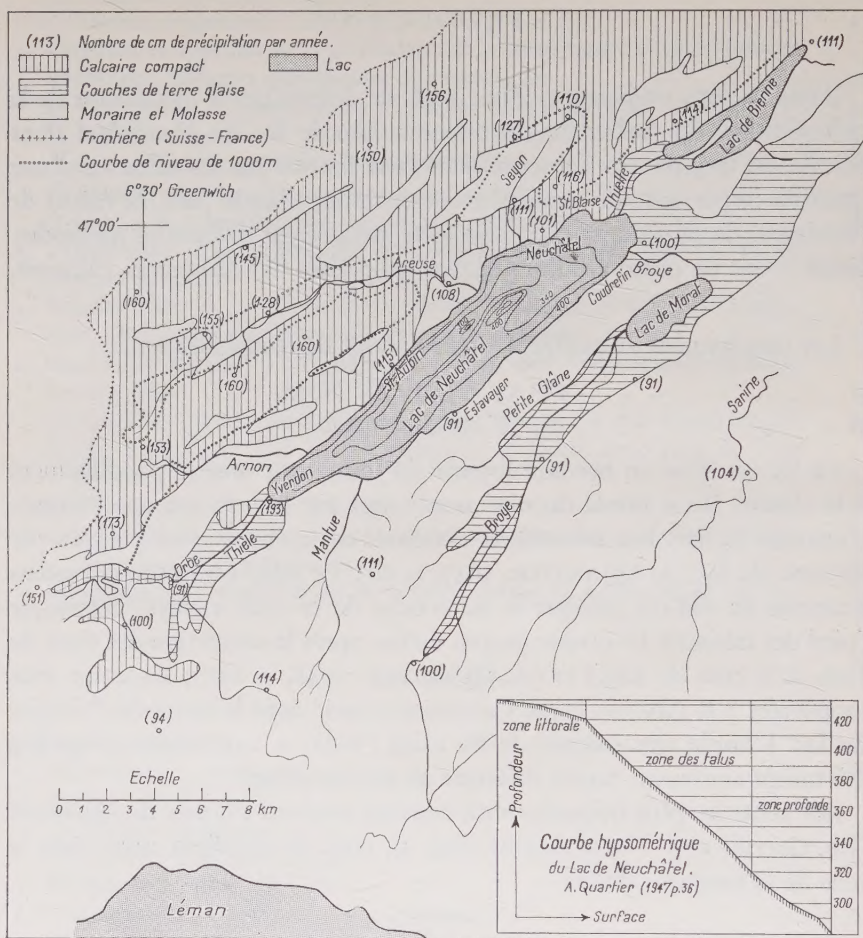


Figure 1
Bassin d'alimentation du lac de Neuchâtel

Son bassin d'alimentation relativement petit (2670 km²) fait partie du bassin hydrographique du Rhin par l'intermédiaire de l'Aar. Il comprend une partie du Jura vaudois et neuchâtelois de même qu'une partie du bassin molassique vaudois et fribourgeois. Il s'étend même à certains endroits jusqu'à 2,5 km du lac Léman. Le Mont-Tendre (1648 m sur mer) est le

point le plus élevé. Le 26,7% de la surface du bassin d'alimentation est à une altitude supérieure à 1000 m; ce qui fait que la fonte des neiges au printemps joue un rôle sensible sur les variations du débit des rivières.

Les précipitations ne sont pas régulières sur l'ensemble du bassin d'alimentation du lac. On peut distinguer principalement deux zones: la zone jurassienne pour laquelle la valeur des précipitations annuelles est comprise entre 110 et 175 cm et la zone du « plateau suisse » où elle est de 90 à 110 cm. Le volume des précipitations annuelles sur le bassin (chute de 122 cm en moyenne) représente environ le quart du volume d'eau du lac. Mais seule la moitié de cette eau parvient au lac, l'autre partie étant évaporée (A. QUARTIER, 1948, p. 84).

Du point de vue géologique, il est possible de distinguer, comme pour les précipitations, deux zones: la zone du Jura formée de calcaires et de marnes, possédant une hydrologie karstique, et la zone du « plateau suisse » constituée de grès, marnes et conglomérats molassiques ainsi que de dépôts glaciaires et fluvioglaciaires. Les natures géologiques différentes des deux zones ne produisent pas une différence appréciable de la teneur en bicarbonate de l'eau des rivières. La dureté temporaire de l'eau de la Broye, à son entrée dans le lac de Morat, est la même que celle de l'Areuse lorsqu'elle se jette dans le lac de Neuchâtel.

Le lac est alimenté principalement, en ne tenant pas compte des sources sous-lacustres (dont on ne connaît pas les débits), par trois rivières: l'Orbe, l'Areuse et la Broye, d'égale importance, qui apportent à elles seules les trois quarts de l'eau fournie au lac. Les embouchures de l'Orbe et de la Broye sont situées aux deux extrémités du lac, celle de l'Areuse sur la rive gauche aux deux tiers de la distance Yverdon-St-Blaise. L'eau qui arrive dans le lac de Neuchâtel est donc répartie d'une façon assez homogène. L'émissaire conduit l'eau depuis le nord-est du lac de Neuchâtel dans le lac de Bienne. Il est intéressant de noter que l'émissaire joue (en moyenne 32 jours par année) le rôle d'affluent et alimente le lac de Neuchâtel avec de l'eau du lac de Bienne; on dit alors que la Thielle « refoule ».

Le lac n'est dans le phénomène du transport de la matière qu'un lieu de transit. Il conserve cependant une partie du matériel qui lui est amené par les rivières.

Ce matériel est apporté au lac de trois manières différentes:

- 1° Il peut être dissous dans l'eau des affluents;
- 2° il peut être en suspension dans l'eau;
- 3° il peut être roulé sur le fond de la rivière.

Le matériel roulé se dépose dans le voisinage immédiat de l'embouchure des affluents et ne joue, de ce fait, qu'un rôle négligeable lors de la formation des sédiments de la région profonde du lac. Comme nous le montrons plus loin (p. 25), le poids de la matière en suspension apporté au lac est nettement inférieur à celui des substances précipitées dans le lac.

Nous avons donc cherché à approfondir spécialement l'étude de la précipitation du CO_3Ca à partir des bicarbonates dissous. Parmi les substances dissoutes apportées au lac par les affluents, les bicarbonates représentent la part la plus importante. L'apport annuel en bicarbonates [comptés en $(\text{CO}_3\text{H})_2\text{Ca}$] est de l'ordre d'un demi-million de tonnes.

De cette quantité, quelle est la part qui précipite dans le lac sous forme de CO_3Ca et quelle est l'épaisseur du dépôt annuel de vase?

Les bicarbonates formant la plus grande partie des sels dissous, quels sont les facteurs qui déterminent la précipitation du CO_3Ca et quel est le processus de la précipitation?

Il nous a paru important de répondre, souvent par de premières approximations, à ces questions, en employant des méthodes nouvelles, et de contribuer ainsi à la connaissance de la géochimie d'un lac appelé à jouer un rôle, toujours important, dans l'alimentation humaine.

QUELQUES DÉFINITIONS

«*La Motte.*» C'est un plateau qui forme dans le lac un haut fond dont le point culminant est situé à 421 m environ, soit à 8 m au-dessous du niveau moyen des eaux (A. QUARTIER, 1947, p. 33).

Epilimnion, métalimnion, hypolimnion. On sait qu'en été la température de l'eau d'un lac ne s'abaisse pas d'une façon régulière de la surface au fond, mais tombe brusquement de plusieurs degrés à une certaine profondeur. Cette zone, caractérisée par un brusque saut de température, THIENEMANN l'appelle *métalimnion*. La couche située entre la surface et le métalimnion est appelée *épilimnion*. L'*hypolimnion* est la zone située au-dessous du métalimnion et s'étend jusqu'au fond du lac (O. RIVIER, 1937, p. 136).

La couche de saut thermique (= *Sprungschicht*) correspond au métalimnion.

Sprungschicht chimique. Elle a été définie par STUNDL (1941, p. 70). Le nom met en évidence l'analogie entre la variation de la température et celle de la concentration des corps dissous avec la profondeur.

Dureté temporaire. Elle est due aux bicarbonates de calcium et de magnésium (*Manuel suisse des denrées alimentaires*, 1939, p. 205). Les valeurs de la dureté temporaire données dans ce travail comprennent en plus de la

teneur en bicarbonates celle du carbonate contenu en suspension. La détermination se fait par acidimétrie. Les résultats sont donnés en milligrammes CO_3Ca par litre.

Lac oligotrophe. D'après la définition de A. THIENEMANN (1923) un lac oligotrophe est caractérisé principalement par :

- 1° le manque de substances humiques;
- 2° la pauvreté de la matière organique dans les sédiments;
- 3° la présence d'oxygène dissous dans les zones profondes du lac.

Un lac *oligotrophe calcaire* est un lac oligotrophe dont la valeur de la dureté temporaire de l'eau est importante.

Craie lacustre. C'est un sédiment dont les caractères mécaniques sont comparables à ceux du beurre tendre ou du ciment fraîchement préparé. La teneur en CO_3Ca doit être supérieure à 80% (M. STANGENBERG, 1938, p. 400).

Débits négatifs. Un débit négatif correspond à un renversement du courant normal de la rivière. On dit alors que la rivière « refofle ». (Pour la Thielle, l'eau passe alors du lac de Bienne dans le lac de Neuchâtel, et pour la Broye, du lac de Neuchâtel dans celui de Morat.)

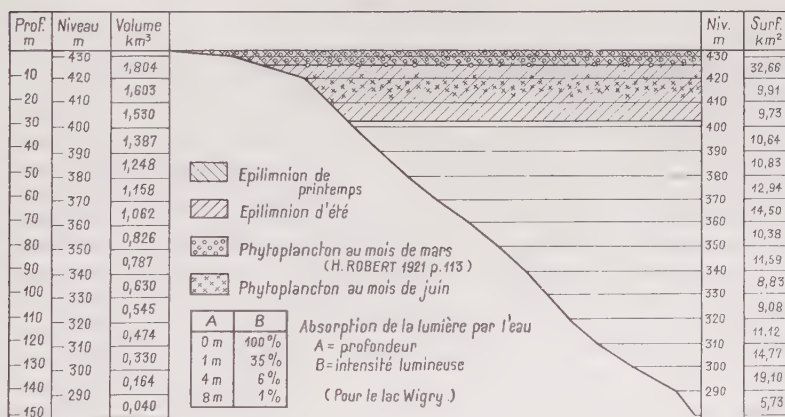


Figure 2
Quelques données relatives au lac de Neuchâtel

Surface totale du lac: 217 km². Volume total: 14,1 km³. Pour le phytoplancton les données sont approximatives. Les courants de convection jouent un rôle déterminant dans la répartition verticale du plancton. H. LOZERON (1901).

*Première partie*DÉTERMINATION DU POIDS DE CARBONATE PRÉCIPITÉ
ANNUELLEMENT DANS LE LAC DE NEUCHÂTEL ET DE
L'ÉPAISSEUR DU DÉPÔT ANNUEL

La valeur de l'épaisseur du dépôt annuel de vase se révèle importante dans la connaissance de la géochimie d'un lac. En effet, toute substance qui est contenue dans l'eau du lac (à l'exception des gaz dissous) n'en sort que pour être emportée par l'eau de l'émissaire ou contribuer à la formation de la vase. Si l'on connaît le débit et la concentration de la substance dans l'eau de l'émissaire, on peut calculer le poids total de la substance soustraite au lac par l'émissaire. Par un calcul semblable, si l'on connaît le poids de sédiment formé annuellement dans un lac et la concentration d'une substance dans le sédiment, on peut connaître le poids de substance soustraite à l'eau du lac pour contribuer à la formation de sédiment. Les débits des rivières étant connus, la connaissance du poids de sédiment fourni permet le calcul des poids respectifs de la substance ainsi éliminée du lac.

La connaissance de l'épaisseur du dépôt annuel pourra donc servir de base à une étude géochimique générale du lac pour des éléments tels que le phosphore, l'azote, le soufre et le chlore.

C'est le suédois E. NAUMANN qui entreprit pour la première fois une étude systématique des sédiments lacustres. Il construisit à cet effet un appareil de prélèvement formé d'un tube de verre dont la partie supérieure est fermée par une soupape en caoutchouc. Cet appareil, employé par F. NIPKOW (1920) dans le lac de Zurich, a permis d'extraire des carottes montrant une alternance de couches foncées et de couches claires. Par une étude microscopique, NIPKOW (1920, p. 110) reconnaît que la couche claire formée de cristaux de CO_3Ca résulte d'une décalcification organique de l'eau du lac, tandis que la couche foncée provient principalement de la décomposition de cadavres d'organismes, en majeure partie de l'*Oscillatoria rubescens*. L'épaisseur totale d'une couche foncée et d'une couche claire est comprise entre 5 et 10 mm. Après avoir fait une série de prélèvements, NIPKOW (1920, p. 109) constate que les couches annuelles ne sont visibles dans le lac de Zurich que dans certains échantillons provenant d'une profondeur supérieure à 90 m. En étendant ses recherches au lac de Baldegg, NIPKOW (1920, p. 122) y trouve aussi des couches annuelles, ce qui lui permet de généraliser les observations faites pour le lac de Zurich.

Cette méthode présente le grand avantage d'être simple, aussi fut-elle employée par plusieurs chercheurs dans d'autres lacs. En 1929, ED. PARÉ-JAS publie une étude des sédiments de la partie occidentale du lac de Genève; il donne une carte du lac avec les épaisseurs des couches annuelles (p. 209) dont la valeur est comprise entre 3 et 18 mm (p. 200). Dans une étude générale des sédiments lacustres, FR. LENZ (1921, p. 329) constate qu'il ne lui a pas été possible d'identifier des couches ayant une genèse biochimique dans les lacs de la région de la Baltique, ceci étant peut-être dû à la faible profondeur de ces lacs. Dans le lac de Constance, les recherches de K. HUMMEL (1923, p. 39) n'aboutissent pas à l'identification de couches annuelles telles que les a décrites NIPKOW. Il remarque parfois quelques bandes foncées dont l'écart varie de 2 ou 3 mm à quelques centimètres. Ces bandes irrégulières ne représentent en aucun cas des couches annuelles.

Une deuxième méthode consiste à immerger au fond du lac un caisson dans lequel se dépose le sédiment. Pour le Lunzer Untersee, G. GÖTZINGER (1911 et 1912) a trouvé que l'épaisseur du dépôt annuel est de 1 mm.

Un tableau des différentes valeurs d'épaisseur des sédiments post-glaciaires est donné par E. WASMUND (1930, p. 134).

Tableau 2
Épaisseur des dépôts annuels

Nom du lac	Année de la détermination	Dépôt annuel en millimètres par année
Lac des Quatre-Cantons, Bassin d'Uri	1898	15,1
Lac des Quatre-Cantons, Bassin de la Muota . .	1898	79,9
Lac des Quatre-Cantons, Bassin de la Muota . .	1899	10,4
Lac des Quatre-Cantons, Bassin de la Muota . .	1901	56,1
Lac de Wallenstadt (près de l'embouchure de la Linth; Tiefenwinkel)	1912	11,3
Lac de Brienz (milieu du lac près d'Iseltwald) . .	1908	31,7
Lunzer Untersee		2,5
Lac Léman		2,9 à 17,9

A côté de ces mesures directes, d'autres auteurs ont voulu résoudre le problème de l'estimation de l'épaisseur du dépôt annuel par des méthodes indirectes, en déterminant l'épaisseur totale du dépôt post-glaciaire. En divisant l'épaisseur ainsi obtenue par le nombre d'années écoulées depuis le retrait du glacier, il est possible d'estimer l'épaisseur moyenne du dépôt annuel.

Pour le lac de Niedersonthofen en Bavière, A. RIESSINGER (1930) a mesuré l'épaisseur du sédiment post-glaciaire qui atteint 21,5 m. E. WASMUND (1930, p. 133) estime l'épaisseur moyenne annuelle à 1,4 mm (la durée de l'époque post-glaciaire étant pour cette région d'environ 15 000 ans).

Par la même méthode, L. MINDER (1923, p. 28) obtient pour le lac de Zurich une estimation de l'épaisseur du dépôt annuel dix fois plus petite que celle indiquée par NIPKOW; il en déduit que le dépôt ne s'est pas toujours formé avec une vitesse constante.

J. FAVRE (1935), par des sondages aux tubes carottiers dans la partie occidentale du lac de Genève, n'a pas pu atteindre la moraine et ramener une série complète des sédiments lacustres post-glaciaires. L'épaisseur maximum atteinte par les sondages a été de 23,10 m.

A côté de ces méthodes générales, il est intéressant de citer celle indiquée par K. HUMMEL (1923, p. 39) qui est basée sur une observation fortuite. Il a observé dans un sédiment, à une profondeur de 20 à 25 cm, des scories. Il suppose que ces scories proviennent des bateaux à vapeur. Or, il n'y a pas plus de 100 ans que ces derniers circulent sur le lac de Constance. HUMMEL peut donc déduire de ces constatations l'épaisseur maximum du dépôt annuel qui est égale à 2 à 3 mm.

L'analyse pollinique est une des méthodes les plus employées pour estimer l'épaisseur moyenne du dépôt annuel des lacs. On détermine l'âge des différentes couches d'un sédiment par comparaison de deux diagrammes: le premier montre la répartition des grains de pollen du sédiment en fonction de la profondeur et le second correspond à la variation de la répartition pollinique pour différentes époques (F. E. ZEUNER, 1946). Ainsi, CH. WASMUND (1939) détermine les variations de l'épaisseur du dépôt annuel du « Grossen Jasmunder » dans l'île Rugen (Baltique), pour différentes époques, en employant les diagrammes de comparaison de T. NILSSON (1935). En Suisse, le travail de M. WELTEN (1944) sur le Faulenseemoos, près de Spiez, rend compte des vitesses de sédimentation dans un marais; la vitesse de sédimentation augmente avec le temps. Le travail de W. LÜDI (1935, p. 106) contient des résultats d'analyses polliniques concernant les sédiments des Grands-Marais (partie nord-est du lac de Neuchâtel).

Nous avons dû renoncer aux prélèvements de carottes profondes, qui nécessitent un appareillage coûteux, ainsi qu'à l'analyse pollinique qui est un travail de spécialistes. Nous avons appliqué les méthodes suivantes qui ont l'avantage de donner divers points de vue sur le problème de la sédimentation dans le lac de Neuchâtel et de permettre une bonne estimation du dépôt annuel sans toutefois exiger des opérations trop nombreuses:

- 1° Identification de couches annuelles.
- 2° Estimation du dépôt annuel, grâce à la précipitation activée de CO_3Ca sur la « Motte ».
- 3° Détermination, par la méthode du bilan, de la quantité totale de CO_3Ca précipité annuellement dans le lac.
- 4° Estimation du dépôt annuel basée sur la décalcification de l'épilimnion pendant l'été.

1. Identification des couches annuelles

Les échantillons prélevés à une profondeur de plus de 100 m sont formés de deux couches de couleurs différentes. La couche supérieure, d'environ 20 cm d'épaisseur, est claire (zone d'oxydation) et la couche inférieure est foncée (zone de réduction).

Le prélèvement de 15 échantillons à différentes profondeurs (8 à 130 m) n'a, en aucun cas, permis d'identifier des couches annuelles telles que les a décrites NIPKOW. On aperçoit des couches foncées, disposées à des distances très variables les unes des autres. K. HUMMEL (1923, p. 39) a remarqué que ces couches doivent correspondre à des développements de sulfobactéries.

Ni les examens microscopiques des carottes, ni les essais de coloration au bleu de méthylène (qui a la propriété de se fixer sur les cristaux de calcite), ni les essais de dissolution par l'eau, analogues à ceux effectués par J. FAVRE (1935, p. 301), n'ont permis de mettre en évidence les couches annuelles.

Par contre, si l'on casse la carotte suivant un plan formant un angle aigu avec la verticale, il apparaît sur la section une structure en escalier dont chacune des marches représente une petite couche.

En supposant que l'épaisseur d'une petite couche corresponde à celle d'une couche annuelle, *la valeur moyenne du dépôt annuel serait de 0,4 mm.* (Ce serait l'épaisseur du dépôt annuel d'un sédiment qui s'est déposé il y a environ quatre siècles.)

2. Estimation du dépôt annuel grâce à la précipitation activée du carbonate de calcium sur la « Motte »

« La Motte » est un monticule immergé qui sépare longitudinalement le lac en deux parties d'égale largeur; le sommet de ce monticule est situé au deux tiers de sa longueur à partir de l'amont. Le point culminant se trouve à 8 à 9 m au-dessous du niveau moyen du lac.

Les carottes prélevées au sommet de la « Motte » révèlent la présence de sédiments de deux types distincts et homogènes qui sont superposés. La couche supérieure est formée d'un sédiment à grains grossiers, très fortement carbonatés, la couche inférieure, d'un sédiment crayeux semblable à celui que l'on trouve dans les autres parties du lac. La délimitation entre les deux couches est très nette, l'épaisseur du sédiment à grains grossiers est de $16,0 \pm 0,5$ cm.

a) Détermination de l'épaisseur moyenne du dépôt annuel du sédiment à grains grossiers (diamètre 0,5 à 0,02 mm)

La présence de ce sédiment à grains grossiers peut être expliquée par l'une ou l'autre des deux hypothèses suivantes :

- 1° L'action des vagues sur le sommet de la « Motte » empêche le matériel fin de se déposer. Les courants entraînent les particules de petit diamètre dans des endroits plus profonds. L'action des vagues et des courants, en éliminant le matériel fin, contribue donc à diminuer l'épaisseur du dépôt annuel.
- 2° Les particules, maintenues en suspension par l'action des vagues sur les sédiments, forment des centres de cristallisation. La présence de ces centres de cristallisation dans la région où précipite le carbonate de calcium, accroît la vitesse de cristallisation et favorise la formation de grosses particules. Il en résulte une précipitation activée de carbonate de calcium et un accroissement de l'épaisseur du dépôt annuel.

Le sédiment à grains grossiers est principalement formé de CO_3Ca (91,6%). La seconde hypothèse semble donc la plus probable puisqu'elle explique d'un même coup la formation d'un sédiment grossier et la forte teneur en carbonate de calcium de ce sédiment.

Il s'agit maintenant de déterminer aussi bien la cause du changement de précipitation que l'époque à laquelle ce changement s'est produit. L'hypothèse la plus probable est que le changement est dû à une variation du niveau du lac. Les études de F. A. FOREL (1892, tome 2, p. 266) sur le lac Léman montrent que la limite de l'action des vagues est à 8 à 10 m de profondeur. Cette valeur coïncide avec celle de la profondeur à laquelle le sédiment considéré a été prélevé. On conçoit dès lors facilement qu'un abaissement du niveau du lac de Neuchâtel ait diminué la distance entre le sommet de la « Motte » et la surface du lac et ait amené le sédiment dans la zone où les déplacements d'eau, dus à l'action des vagues, modifient la précipitation du CO_3Ca .

En connaissant l'époque de ce changement de niveau du lac, il sera facile de calculer l'épaisseur du dépôt annuel du sédiment à grains grossiers. On déduit de la netteté de la délimitation entre les deux sédiments que le changement de niveau a dû se produire sur une période assez courte. Le sédiment à grains grossiers est homogène jusqu'en surface. On peut donc supposer que seul le dernier changement de niveau de l'eau du lac ait produit la modification de la précipitation du CO_3Ca . Dans l'histoire récente, la correction des eaux du Jura est le seul événement qui ait produit un abaissement définitif et rapide du niveau du lac. Cet important travail a abaissé le niveau moyen du lac de 2,7 m, du premier janvier 1869 au 31 décembre 1888. Bien que la correction s'étende sur une période de 20 ans, on peut admettre qu'à partir de 1879 le niveau du lac avait atteint sa cote actuelle. Le changement de sédimentation sur la « Motte » a eu lieu soit en 1878 soit en 1879.

Le calcul de l'épaisseur du dépôt annuel est le suivant :

$$\text{dépôt annuel} = \frac{160 \text{ mm}}{70} = \frac{160 \pm 5}{70 \pm 1} = 2,3 \pm 0,1 \text{ mm par année.}$$

Le contrôle de l'épaisseur du dépôt annuel peut être effectué par une mesure directe qui nous a été proposée par M. E. WEGMANN. Il suffit de répandre à une date donnée une couche très mince de poussière de charbon sur la surface du sédiment. Cette opération a été effectuée le vendredi 30 juin 1950 en collaboration avec l'Inspectorat de la Chasse et de la Pêche du canton de Neuchâtel. 200 kg de poussières d'antracite ont été répandus sur une surface de 100 m² autour du sommet de la « Motte ».

Il sera donc possible, dans quelques années, de mesurer directement l'épaisseur du dépôt annuel et de vérifier le bien fondé de nos hypothèses.

b) Calcul de l'épaisseur moyenne du dépôt annuel du sédiment à grains fins

Si les hypothèses émises précédemment sont justifiées, il doit exister une relation entre l'épaisseur du sédiment à grains grossiers et celle du sédiment crayeux. Pour établir une correspondance entre ces deux valeurs, nous avons repris les idées émises par M. WELTEN (1944, p. 125). Cet auteur constate, dans une série d'échantillons extraits du Faulenseemoos, près de Spiez, que plus la concentration en argile est grande, plus l'épaisseur du dépôt annuel est petite. Il arrive à la conclusion que l'épaisseur du dépôt annuel dépend principalement de la quantité de carbonate de calcium qui est précipitée, l'argile n'étant que la substance accompagnante. Pour le lac

de Neuchâtel, nous supposons que la quantité annuelle de substance, autre que le carbonate de calcium, déposée par unité de surface, avant et après la correction des eaux du Jura est constante.

Le 91,6% en poids de la substance composant la couche supérieure est formée de CO_3Ca . Dans la couche inférieure de la carotte, la concentration en CO_3Ca est de 67,3%.

En appelant V_1 le volume, d_1 la densité du sédiment de la couche supérieure de la carotte, V_2 et d_2 les valeurs correspondantes pour la couche inférieure, on peut écrire:

$$(100 - 91,6) V_1 \cdot d_1 = (100 - 67,3) V_2 \cdot d_2. \quad (1)$$

La valeur de d_1 est voisine de celle de d_2 . Il en résulte:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{32,7}{8,4} = 3,9, \quad (2)$$

$$d_1 = 1,24 \quad d_2 = 1,26 \text{ (densité du sédiment avec eau).}$$

En considérant une précipitation par unité de surface, en appelant e l'épaisseur du sédiment, on peut poser:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{V_1}{V_2} = 3,9. \quad (3)$$

L'épaisseur du dépôt annuel du sédiment à grains grossiers est de 2,3 mm ($e_1 = 2,3$ mm).

$$e_2 = \frac{2,3 \text{ mm}}{3,9} = 0,6 \text{ mm}. \quad (4)$$

D'après ce calcul, l'épaisseur du dépôt annuel du sédiment crayeux situé sur la «Motte» est de 0,6 mm.

3. Méthode du bilan. Détermination de la quantité totale des carbonates précipités annuellement dans le lac de Neuchâtel

Cette méthode consiste à estimer d'une part le poids de carbonates amené au lac par les affluents et d'autre part le poids qui est enlevé par l'émissaire. La différence entre ces deux valeurs donne le poids de carbonates précipités.

Le poids des matières en suspension apportées au lac par les affluents est estimé à la page 25. Il est négligé dans le calcul qui suit. On suppose en outre que la quantité de carbonate amené par l'air sous forme de poussière est négligeable.

Pour mener à bien un tel calcul, il faut connaître les débits et la dureté des affluents et de l'émissaire.

a) Débits des affluents

Les débits des affluents les plus importants ont été mesurés par le Service fédéral des eaux. Les valeurs données sont des moyennes prises sur 24 à 32 années. Les débits des rivières de seconde importance ont été calculés grâce à la connaissance de la surface de leur bassin d'alimentation et à l'estimation du débit spécifique moyen du bassin (le débit spécifique moyen est donné en m³/s au km²). (A. QUARTIER, 1948, p. 112 et 113.)

Les rivières se jetant dans le lac de Neuchâtel appartiennent au type pluvio-nival jurassien (M. PARDE, 1947, p. 102). « Le débit maximum a lieu en avril, il est dû à la fonte des neiges. L'étiage d'été dû à l'évaporation est partout plus bas que celui d'hiver, qui lui, est déterminé par la rétention nivale. Le rapport des moyennes mensuelles extrêmes est faible: 2,5 à 3,5. »

Tableau 3

Quotient Débit mensuel moyen/Débit annuel moyen pour les trois rivières importantes et l'émissaire

Mois de	1 Areuse à Champ du Moulin	2 Orbe à Orbe	3 Broye à Sugiez	1+2+3 A	Thielle B	Diffé- rence A - B	Niveau du lac
Janvier	1,00	0,97	1,30	1,09	1,31	- 0,22	minimum
Février	0,89	0,89	1,29	1,02	1,26	- 0,24	
Mars	1,38	1,21	1,41	1,33	1,24	+ 0,09	
Avril	1,76	1,65	1,10	1,51	1,20	+ 0,31	
Mai	1,16	1,27	0,76	1,07	0,68	+ 0,39	maximum
Juin	0,76	0,80	0,72	0,76	0,68	+ 0,08	
Juillet	0,71	0,74	0,73	0,73	0,67	+ 0,06	
Août	0,61	0,71	0,73	0,68	0,72	- 0,04	
Septembre	0,72	0,76	0,75	0,74	0,88	- 0,14	
Octobre	0,83	0,87	0,92	0,87	1,02	- 0,15	
Novembre	1,15	1,10	1,12	1,12	1,20	- 0,08	
Décembre	1,09	1,04	1,12	1,09	1,20	- 0,11	
Débit moyen m ³ /s	13,0	12,5	12,2	37,7	52,6		

En plus des moyennes mensuelles, les débits maxima pour chacun des cours d'eau sont les suivants.

Areuse

Maximum 140 m³/s, décembre 1918 (moyenne du mois de décembre 14,2 m³/s), 143 m³/s, novembre 1944.

Les pointes de débit, pour des années normales, sont comprises entre 80 et 110 m³/s (pour les années 1935 à 1949).

Orbe

Maximum 140 m³/s, décembre 1918 (moyenne du mois de décembre 13 m³/s).

Les pointes de débit, pour des années normales, sont comprises entre 75 et 110 m³/s (pour les années 1936 à 1949).

Broye

Maximum 75 m³/s, mars 1937 (moyenne mois de mars 17,2 m³/s), 78 m³/s, décembre 1944 (moyenne de décembre 13,7 m³/s).

Les pointes de débit, pour des années normales, sont comprises entre 20 et 50 m³/s (pour les années 1935 à 1949)¹⁾.

b) Dureté temporaire de l'eau des affluents

La dureté temporaire des eaux des affluents du lac de Neuchâtel varie assez peu au cours de l'année. Pour la plupart des affluents, les *variations sont rarement supérieures au 10% de la plus forte valeur*, à l'exception de la Broye dont la dureté des eaux varie d'environ 30% (il se produit pour cette dernière une décalcification dans le lac de Morat pendant l'été).

1. Dureté de l'eau de l'Areuse

Le dosage de la quantité de bicarbonates contenus dans l'eau de l'Areuse prélevée près de l'embouchure (1,5 km) a donné les résultats suivants:

Tableau 4

Dureté temporaire de l'eau de l'Areuse, près de l'embouchure

Date	Dureté temporaire comptée en CO ₃ Ca	Débit journalier
31 août 1949	208 mg/l	1,64 m ³ /s
1 ^{er} octobre 1949 . . .	192 mg/l	1,20 m ³ /s
17 mars 1950	195 mg/l	5,43 m ³ /s
3 avril 1950	195 mg/l	2,30 m ³ /s

¹⁾ Ces valeurs sont tirées de l'*Annuaire hydrographique suisse* (1949).

2. Dureté de l'eau de l'Orbe

L'eau a été prélevée dans la ville d'Yverdon.

Tableau 5

Dureté temporaire de l'Orbe à Yverdon

Date	Dureté temporaire comptée en CO_3Ca	Débit journalier
31 août 1949	166 mg/l	4,54 m^3/s
17 mars 1950	185 mg/l	12,0 m^3/s

3. Dureté de l'eau de la Broye

La dureté de l'eau de la Broye est influencée par le passage de la rivière à travers le lac de Morat. L'eau y subit une décalcification qui est très sensible en été. En admettant que l'eau qui sort du lac de Morat est de l'eau de surface, on remarque d'après les mesures de O. RIVIER (1937, p. 145) que la décalcification de l'eau de la Broye est de 30% au mois d'août.

Tableau 6

Décalcification de l'eau de la Broye lors de son passage par le lac de Morat

Date	Eau de la Broye à Salavaux	Eau de surface du lac de Morat	Température de l'eau du lac
10 juillet 1935 .	189 mg/l	160 mg/l	24,0° (9 juillet)
23 août 1935 . .	209 mg/l	145 mg/l	22,1° (23 août)

Les dosages de l'eau de la Broye à la Sauge ont révélé la présence d'une quantité appréciable de carbonate en suspension (précipité chimiquement).

Tableau 7

Dureté temporaire et concentration en carbonate en suspension dans l'eau de la Broye à la Sauge

Date	Dureté temporaire comptée en CO ₃ Ca	Débit journalier	CO ₃ Ca en suspension
31 août 1949 . .	(110) mg/l	− 2 m ³ /s ¹⁾	6 mg/l
17 mars 1950 . .	189 mg/l	+ 7 m ³ /s	
14 mai 1950 . .	160 mg/l	+ 2 m ³ /s	

¹⁾ Les valeurs négatives indiquent que l'eau du lac de Neuchâtel coule dans le lac de Morat.

4. Dureté de l'eau de la Thielle

La dureté de l'eau de la Thielle est à peu de chose près la même que celle de l'eau de surface du lac de Neuchâtel, à l'exception des périodes pendant lesquelles elle « refoule » dans le lac de Neuchâtel l'eau du lac de Bienné.

Tableau 8

Dureté de l'eau de la Thielle, à Thielle

Date	Dureté de l'eau de surface du lac en mg CO ₃ Ca/l	Dureté de l'eau de la Thielle en mg CO ₃ Ca/l	Débit journalier de la Thielle
31 août 1949 . .	115 (31 août)	(99) refoule	— 31,8
19 octobre 1949 .	108 (13 octobre)	110	32,8
	120 (28 octobre)		
17 mars 1950 . .	139	139	78
14 mai 1950 . .	—	112	30

c) Influence des rives sur la dureté de l'eau du lac

Pour simplifier le calcul du bilan, nous admettons que l'influence des rives est négligeable sur les échanges de CO₃Ca avec le lac. Or, les échanges en eau, donc en bicarbonates entre le lac et les rives sont nombreux; ils dépendent des variations du niveau du lac. On peut, en effet, considérer le lac comme entouré d'annexes, formant un second lac dont l'eau est contenue entre les particules des terrains des rives. D'après le principe des vases communicants, si le niveau du lac monte, le niveau de l'eau contenue dans les sables monte, une plus grande quantité de sable est ainsi imprégnée; si le niveau baisse, une partie de l'eau contenue dans les sables se déverse dans le lac. J. WISZNIERWSKI (1934, p. 183) a mesuré la quantité d'eau contenue dans les sables; elle est de l'ordre de 15 à 30% (en poids) et dépend étroitement du caractère granulométrique de l'échantillon. L'eau contenue dans le sable est soumise à l'évaporation. Si le niveau du lac restait le même durant toute l'année, le lac perdrait par évaporation de l'eau des sables, une quantité appréciable de CO₃Ca. La dureté de l'eau contenue dans les sables est plus grande que celle de l'eau du lac. Pour le lac Wigry (Pologne), d'après WISZNIERWSKI, elle est le double de celle de l'eau du lac. L'augmentation de la dureté temporaire est encore plus sensible pour l'eau contenue dans la craie lacustre. Des mesures de la

dureté de l'eau contenue dans la craie lacustre de Cerlier, nous ont permis d'établir qu'elle pouvait atteindre cinq fois la dureté de l'eau du lac. Cette forte teneur en bicarbonates est due à la décomposition dans le sable des matières organiques. Cette décomposition produit la formation de CO_2 qui, en abaissant le pH (W. et H. SCHMASSMANN, 1948), favorise la dissolution du CO_3Ca . Dans la craie lacustre de Cerlier, le pH est de 6,7, dans la tourbe des Grands-Maraïs, il est compris entre 5 et 5,5 (KELLERHALS, 1896).

On déduit de ces quelques constatations que le sable des rives du lac reçoit, lorsque le niveau du lac monte, une solution diluée de bicarbonates. Une part de cette eau est évaporée. Lorsque le niveau du lac baisse, le lac reçoit une solution plus concentrée de bicarbonates. Les deux actions agissent en sens inverse. Il n'est toutefois pas possible de démontrer qu'elles se compensent.

Des échanges d'une autre nature peuvent aussi se produire entre les rives et le lac. Les vagues peuvent par action mécanique casser les croûtes de CO_3Ca sur les galets des rivages et former ainsi un sable calcaire (J. PIA, 1937, p. 124) qui est entraîné vers les profondeurs du lac.

Par contre, les vagues peuvent aussi rejeter sur les rives de la vase et prélever de ce fait au lac du CO_3Ca (WISZNIEWSKI, 1934, p. 177).

Pour le lac de Neuchâtel, ces deux phénomènes tout en étant de première importance pour la formation des sédiments des régions peu profondes (profondeur inférieure à 25 m) n'influent probablement plus la formation des sédiments des régions semi-profondes et profondes du lac.

Pour être complet, il faudrait encore tenir compte des sources sous-lacustres. Malheureusement, il n'existe encore aucune donnée à ce sujet. A. QUARTIER (1947, p. 82) pense que leur apport en eau, donc en CO_3Ca , ne doit pas être important.

d) Calcul du poids de carbonate précipité annuellement dans le lac et dans ses annexes

La détermination de la dureté des eaux de toutes les rivières, y compris de l'émissaire, à une date donnée, rend possible l'estimation de la quantité de CO_3Ca déposé dans le lac et ses annexes. Cette quantité est la somme des produits du débit annuel moyen par la dureté temporaire de chacune des rivières. Une telle méthode est critiquable puisqu'elle nécessite le produit de deux quantités qui ne sont pas correspondantes, la mesure du débit étant une moyenne d'une série de mesures, l'autre, la mesure de la dureté temporaire, étant une mesure faite à un jour donné. Cette manière de faire

peut cependant se justifier par le fait que la dureté des eaux des rivières varie assez peu dans le courant de l'année et peut être en première approximation supposée constante.

Il nous a paru nécessaire de faire au moins deux séries de prélèvements et d'analyses, à des époques où les duretés des eaux d'une même rivière diffèrent le plus, c'est-à-dire au printemps et en été. Les résultats de ces déterminations sont donnés dans le tableau 9.

Tableau 9
Bilan du CO₃Ca précipité dans le lac de Neuchâtel en une année

Rivière	Débit annuel 10 ⁸ m ³	31 août 1949		17 mars 1950	
		Dureté temporaire	CO ₃ Ca 10 ³ t	Dureté temporaire	CO ₃ Ca 10 ³ t
Seyon	1,08	235	25	228	25
Serrières					
Areuse	4,17	208	83	195	81
Arnon	0,81	253	21	209	17
Orbe (Yverdon)	4,39	166	73	185	81
Mantue	0,34	214	7	187	6
Broye	4,22	145	61	189	80
Thielle (refoule)	0,88	99	9	(110)	10
Ruisseaux	1,36	(180)	24	(180)	24
Total	17,25	[170]	303	[188]	324
Thielle (émissaire)	17,5	(117)	205	139	243

Les valeurs entre parenthèses sont des valeurs estimées. Les valeurs comprises entre crochets indiquent les valeurs de la dureté temporaire qu'aurait une rivière hypothétique qui serait la somme de tous les affluents se jetant dans le lac.

La quantité de CO₃Ca précipité est donc égale pour la première estimation à

$$303 \cdot 10^3 \text{ t} - 205 \cdot 10^3 \text{ t} = 98 \cdot 10^3 \text{ t de CO}_3\text{Ca.}$$

La seconde estimation donne

$$324 \cdot 10^3 \text{ t} - 243 \cdot 10^3 \text{ t} = 81 \cdot 10^3 \text{ t de CO}_3\text{Ca.}$$

Une quantité d'environ 9 · 10⁴ tonnes de CO₃Ca se précipite donc annuellement dans le lac de Neuchâtel et ses annexes.

La bonne concordance entre les deux estimations est due à ce que la variation de la dureté temporaire de la Broye et de la Thielle (émissaire) ont lieu dans le même sens. Ainsi pendant l'été la concentration en bicar-

bonates de l'émissaire étant plus petite qu'en hiver, la concentration de l'eau fournie par la Broye étant aussi plus faible qu'en hiver, il se produit de ce fait une certaine compensation. Si les débits des rivières étaient constants, on pourrait dire que pour chaque mois la quantité de CO_3Ca entrant dans le lac de Neuchâtel est la même. Mais les débits des rivières ne sont pas constants (voir tableau 3, p. 17), et surtout, le bilan mensuel de l'eau qui entre et qui sort du lac ne s'équilibre pas. La différence entre le poids de CO_3Ca apporté au lac et celui emporté hors du lac, pour le mois d'août, est alors de $3 \cdot 10^3$ t. Pour le mois d'avril (en estimant égales les duretés des rivières aux mois de mars et d'avril) elle est de $13 \cdot 10^3$ t. La grande différence entre ces deux valeurs provient du fait qu'au mois d'avril, il entre par les rivières plus d'eau qu'il n'en sort par l'émissaire.

e) Estimation de l'épaisseur du dépôt annuel de la vase calcaire sur le fond du lac

Il est facile, connaissant le poids de CO_3Ca précipité annuellement, la teneur en carbonate et la densité de la vase calcaire, de calculer le volume de vase formée annuellement. On déduit de cette valeur l'épaisseur du dépôt annuel en carbonates. Pour qu'un tel calcul ait une signification, il faut que cette épaisseur soit la même sur tout le fond du lac.

Discussion de l'homogénéité de la précipitation

Le fond du lac peut être divisé en deux régions. Une région profonde et l'autre peu profonde, de 0 à 30 m, sur le fond de laquelle on trouve des galets et du sable. La région profonde est couverte de vase. La surface de la région peu profonde (30 m) est de 52 km² ce qui représente un peu moins d'un quart de la surface totale du lac.

La précipitation n'est en tous cas pas identique dans ces deux régions. D'une façon générale, le sédiment de la région peu profonde est le sédiment le plus calcaire. Les conditions de précipitation sont particulières lorsque la profondeur d'une mer est petite et que l'épilimnion peut entrer en contact avec le fond. Lorsque ces conditions se produisent, le sol est recouvert d'un sédiment calcaire (H. WATTENBERG, 1937, p. 252). Les mesures de HUMMEL (1923, p. 43) pour le lac de Constance montrent cette décroissance de la teneur en carbonate des sédiments avec la profondeur de prélèvement. Les analyses de J. ROMIEUX (1930, p. 215) concernant des sédiments du lac Léman mettent aussi en évidence la plus faible teneur en CO_3Ca des sédiments des zones profondes de ce lac. D'après

G. LUNDQUIST (1942, p. 13), la teneur en carbonate est élevée près des rivages et diminue avec la profondeur.

La formation rapide d'une croûte calcaire sur les galets du bord du lac et la proportion appréciable de matériel carbonaté (50%), font croire à une précipitation accentuée de CO_3Ca dans la zone peu profonde. Il précipiterait dans la région profonde du lac une quantité plus faible que celle calculée en supposant une précipitation homogène dans tout le lac. L'estimation de l'épaisseur du dépôt annuel par cette méthode est donc une estimation maximum.

Il reste encore à prouver que la précipitation est homogène sur toute la surface du fond du lac correspondant aux régions semi-profondes et profondes. La vérification est donnée par l'analyse chimique des sédiments du lac de Neuchâtel prélevés par RISLER et WALTER (1887, p. 122), F.-A. FOREL (1892, p. 135) et FR. ZENDER (1908, p. 37) et nos prélèvements dans les régions semi-profondes et profondes du lac. Ces analyses permettent d'estimer à $67 \pm 4\%$ la concentration en CO_3Ca d'un échantillon séché à l'étuve (110°C).

Calcul de l'épaisseur du dépôt annuel

Poids du carbonate (compté en CO_3Ca)	90 000 t
Carbonate dans la vase séchée	$67,3 \pm 4\%$
Eau par rapport à la vase séchée	$145 \pm 5\%$
Densité de la vase	$1,4 \text{ t/m}^3$
Surface du lac	217 km^2

La valeur de l'épaisseur du dépôt annuel, en supposant un dépôt uniforme sur toute la surface du lac, est de $0,93 \text{ mm par an}$. Un tel calcul n'est valable que si la quantité de matière contenue en suspension dans l'eau des affluents est nettement inférieure au poids de CO_3Ca précipité dans le lac.

f) Estimation de la quantité de matières en suspension apportées par les affluents

Quelques dosages de la matière contenue en suspension dans l'eau des affluents, lors de forts débits, ont été effectués pour les rivières suivantes.

Tableau 10

Teneur en matière en suspension pour de forts débits des affluents du lac de Neuchâtel

Date	Rivière	Matière en suspension mg/l	Soluble dans HCl	Débits en m^3/s
12 avril 1950 . . .	Areuse	28	50%	27,9
15 novembre 1950 .	Areuse	34	85%	76,3
15 novembre 1950 .	Seyon	24	90%	—
15 novembre 1950 .	Orbe (Yverdon)	10	87%	61,0

Si le débit des rivières est normal ou plus faible que la normale, l'eau ne charrie pas une quantité appréciable de matériel en suspension, sauf parfois un peu de CO_3Ca précipité chimiquement à partir des sels dissous (Broye et Orbe).

L'eau de l'Areuse ne se trouble que lorsque le débit devient important. Fixons arbitrairement à $15 \text{ m}^3/\text{s}$ le débit à partir duquel l'Areuse charrie du matériel en suspension. Pour l'année 1949, d'après les données de l'*Annuaire hydrographique suisse*, on peut se rendre compte que pendant 43 jours le débit fut supérieur à $15 \text{ m}^3/\text{s}$. L'eau trouble ainsi reçue par le lac représente environ les deux cinquièmes du volume d'eau fourni par l'Areuse au lac¹⁾. On peut estimer la quantité de matière en suspension apportée par l'Areuse comme étant égale au produit du volume d'eau trouble multiplié par la concentration moyenne de la matière en suspension, estimée à 30 mg/l . (Débit total annuel pour 1949 = $2,23 \cdot 10^8 \text{ m}^3$.)

Le poids de la matière en suspension apportée au lac par l'Areuse est approximativement de $2,5 \cdot 10^3 \text{ t}$. Comme le montre le tableau 10, l'Orbe contient beaucoup moins de matière en suspension que l'Areuse; le Seyon aussi en contient moins. On peut donc grossièrement supposer que la quantité normale de matière en suspension apportée annuellement au lac est de l'ordre de 5000 à 10000 t. Pour des années exceptionnelles (comme 1918 et 1950) la quantité de matière en suspension est peut-être de 4 à 5 fois plus importante.

En résumé, il est normal de penser que le matériel en suspension apporté par les affluents au lac de Neuchâtel ne constitue qu'un apport secondaire lors de la formation des sédiments.

4. Estimation de l'épaisseur du dépôt annuel basé sur la décalcification de l'épilimnion pendant l'été

Cette méthode est basée sur une constatation faite par FR. NIPKOW (1920, p. 144) pour le lac de Zurich: dès le printemps, il se produit dans l'eau de surface une décalcification pouvant atteindre le 25% du contenu primitif en carbonates.

Ce phénomène a été étudié depuis pour différents lacs: Pour le lac Wigry par M. STANGENBERG (1935); pour le lac de Morat par O. RIVIER (1937, p. 145); pour le lac Léman par P. BALAVOINE (1939, p. 36).

En estimant, premièrement, que chaque litre d'eau, jusqu'à une profondeur de 25 m, perd approximativement en moyenne 10 mg de CO_3Ca du

¹⁾ Pour l'année 1947, le rapport est de trois quarts; il est d'un demi pour l'année 1948.

mois de mars au mois de septembre, en connaissant, deuxièmement, la surface du lac de Genève qui est de 582 km^2 , BALAVOINE détermine la quantité de CO_3Ca ainsi insolubilisé à $145 \cdot 10^3 \text{ t}$.

Il nous a paru utile de discuter la valeur d'une telle estimation.

La méthode de BALAVOINE est tout à fait justifiable, si l'on s'occupe d'un lac qui ne possède ni affluents ni émissaire et dont les seuls échanges avec l'extérieur sont d'ordre calorifique. Or ce cas idéal n'est ni celui du lac Léman, ni celui du lac de Neuchâtel.

Comme nous l'avons établi précédemment, le lac reçoit d'une façon continue une certaine quantité de carbonates (différence entre la quantité de carbonates apportée par les affluents et celle emmenée par l'émissaire). En plus du poids p_1 de CO_3Ca estimé par BALAVOINE, il précipite encore le CO_3Ca ammené d'une façon continue, du mois de mars au mois de septembre (poids p_2). Le poids total de CO_3Ca précipité entre ces deux dates est égal à:

$$p = p_1 + p_2. \quad (5)$$

Il faut noter l'interdépendance complète entre ces deux valeurs p_1 et p_2 . Le poids p_1 dépend de conditions climatiques et p_2 des précipitations et du bassin d'alimentation. Connaissant la valeur de p_1 , il n'est pas possible, *a priori*, d'estimer p_2 , donc la valeur du poids total de CO_3Ca précipité.

a) Calcul de p_1 , le poids de carbonate de calcium précipité en considérant uniquement les concentrations en carbonates de l'eau du lac au mois de mars et au mois de septembre

Comme c'est le cas pour l'eau du Léman, l'eau du lac de Neuchâtel a une teneur en carbonates dissous maximum au mois de mars et minimum au mois de septembre. On connaît la valeur de la dureté temporaire en fonction de la profondeur, le poids de carbonate de calcium dissous est égal au produit du volume d'eau par la dureté de l'eau. Ce calcul est effectué dans le tableau II.

Tableau 11

Estimation du CO_3Ca dissous dans les couches supérieures du lac aux deux dates suivantes

Profondeur m	Volume km^3	8 septembre 1949		15 mars 1950	
		Dureté en 10^3 t/km^3	Poids de $\text{CO}_3\text{Ca } 10^3 \text{ t}$	Dureté en 10^3 t/km^3	Poids de $\text{CO}_3\text{Ca } 10^3 \text{ t}$
0 à 10	1,80	112	202	137	246
10 à 20	1,60	128	205	137	219
20 à 30	1,53	135	207	137	209
30 à 153	—	137	—	137	—
Total			614		674

En faisant la différence entre la quantité de bicarbonates dissous dans les couches supérieures du lac aux deux dates indiquées ci-dessus, on constate que le lac contient $60 \cdot 10^3$ t de CO_3Ca dissous de moins en été qu'en hiver. Il n'est pas impossible que la valeur de cette estimation soit trop forte. Comme nous le verrons ultérieurement (p. 50), il se produit toujours dans un lac une certaine répartition des substances dissoutes qui fait qu'une diminution de la concentration en surface entraîne presque toujours une augmentation en profondeur.

b) Détermination de p_2 , le poids de carbonate de calcium apporté au lac du mois de mars au mois de septembre moins le poids de carbonates emportés par l'émissaire

Comme il l'a été démontré précédemment, l'apport de CO_3Ca au lac dépend en première approximation du débit des rivières et de l'émissaire. Entre le 15 mars et le 8 septembre, la quantité de carbonates qui entre dans le lac de Neuchâtel et qui en ressort est représentée par le 40% de la quantité précipitée annuellement.

$$p_2 = 90\,000 \text{ t} \cdot 0,4 = 36\,000 \text{ t.}$$

La quantité totale de CO_3Ca précipitée p est alors:

$$p = 60\,000 + 36\,000 = 96\,000 \text{ t de } \text{CO}_3\text{Ca.}$$

Le poids de CO_3Ca précipité dans le lac de Neuchâtel estimé par l'étude de la décalcification de l'épilimnion est de $96 \cdot 10^3$ t.

La concordance entre la valeur obtenue par cette méthode et celle donnée par la méthode du bilan est bonne. La différence entre les deux résultats peut provenir des conditions particulières de l'été 1949, qui s'est révélé particulièrement chaud. Il s'est produit cette année-là une décalcification plus accentuée qu'à l'ordinaire de l'eau de surface. La valeur de p_1 est donc trop forte.

D'après le calcul précédent, on remarque que la quantité de CO_3Ca estimée par la méthode de BALAVOINE correspond, pour le lac de Neuchâtel, aux 62% de la quantité totale.

L'épaisseur du dépôt annuel calculée d'après les valeurs obtenues ci-dessus est de 1 mm par an. (Calcul analogue à celui effectué à la page 24.)

5. Comparaison des résultats obtenus lors de la détermination du poids de carbonate de calcium précipité annuellement et de l'épaisseur du dépôt annuel

La quantité de CO_3Ca qui est précipité en moyenne, annuellement, dans le lac de Neuchâtel est de 90000 t. La bonne concordance entre les valeurs obtenues par la méthode du bilan et celle correspondant à la décalcification de l'épilimnion permet d'estimer l'erreur à environ 5 à 10%.

Les valeurs de l'épaisseur du dépôt annuel estimé par les méthodes suivantes sont résumées dans le tableau 12.

Tableau 12

Epaisseur des dépôts annuels de vase dans le lac de Neuchâtel

Méthode	Epaisseur du dépôt annuel pour la région semi-profonde et profonde du lac	
1° Par observation directe . .	0,4 mm	
2° Par la précipitation activée sur la «Motte»	{ 2,3 mm	sédiments à grains grossiers
3° Par la méthode du bilan .	{ 0,6 mm	sédiments à grains fins
4° Par la décalcification de l'épilimnion	0,9 mm	
	1 mm	

Les estimations données par les méthodes 3 et 4 sont des estimations maxima. En prenant la moyenne entre les chiffres minima 0,4 mm par an et maxima 1 mm par an, on peut estimer à environ $0,7 \pm 0,3$ mm par an l'épaisseur moyenne du dépôt annuel.

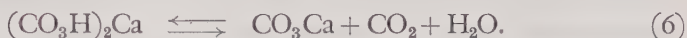
Il faut encore spécifier que la valeur de l'épaisseur du dépôt annuel ainsi déterminée est celle qui correspond à l'époque *actuelle* du lac. Comme l'a montré MINDER (1925) pour le lac de Zurich, la vitesse de sédimentation varie avec le temps. Il n'est guère possible de prédire avec certitude quelle sera à l'avenir l'épaisseur du dépôt annuel de la vase dans le lac de Neuchâtel. On peut seulement prévoir une augmentation progressive de la teneur en matière organique, l'apport en phosphate favorisant le développement du plancton, ce qui provoquera une précipitation accentuée de CO_3Ca . Il ne faut pas oublier qu'un jour cette précipitation calcaire prendra fin puisqu'elle ne correspond qu'à une époque de la vie d'un lac (G. LUNDQUIST, 1925, p. 114). L'arrêt de la précipitation carbonatée est produit par la présence dans un lac d'une très grande quantité de matière organique et la production de substances humiques (I. HESSLAND, 1949, p. 103).

Deuxième partie

MÉCANISME DE LA PRÉCIPITATION DU CARBONATE DE CALCIUM

La réaction de la précipitation du CO_3Ca à partir du $(\text{CO}_3\text{H})_2\text{Ca}$ a été étudiée aussi bien par des physico-chimistes que par des géologues et des hydrologues.

Elle est représentée le plus souvent par l'équation chimique suivante:

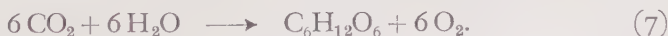


Il s'agit d'une réaction d'équilibre. Le départ de CO_2 produit la précipitation de CO_3Ca ; une augmentation de la teneur en CO_2 favorise la formation de bicarbonates par dissolution du carbonate contenu en suspension dans l'eau.

D'après J. PIA (1933, p. 4), les facteurs qui dans une masse d'eau favorisent le départ de CO_2 (donc la formation de CO_3Ca), sont de deux ordres:

Les facteurs organiques, si la formation de CO_3Ca est due à la présence d'organismes (photosynthèse, décomposition microbienne) et les facteurs inorganiques, s'il se produit des modifications des conditions physiques (température, pression du CO_2 , évaporation de l'eau).

L'assimilation du CO_2 par le phytoplancton est pour E. WASMUND (1930, p. 124 et 125) et pour RAMAN (1906, p. 174), le facteur le plus important dans la précipitation du CO_3Ca . La présence de plancton dans les couches supérieures du lac produit une diminution de la concentration en CO_2 et favorise la formation d' O_2 . Selon G. J. WEREŠČAGIN (1931, p. 20) l'équation serait:



Dans les couches profondes du lac, les substances organiques sont oxydées selon l'équation (7), mais prise dans le sens inverse. La teneur en O_2 diminue alors au profit de celle en CO_2 . Il résulte de ces remarques que l'on peut établir un bilan comportant la quantité de matière organique et les teneurs en CO_2 et en O_2 (K. M. STROM, 1928, p. 337). Les courbes exprimant les variations de la teneur en CO_2 et en O_2 avec la profondeur de prélèvement de l'eau, sont symétriques. Ces affirmations ont été vérifiées entre autre pour l'Érensée (Suède) et Canadice (Canada) par H. HALB-

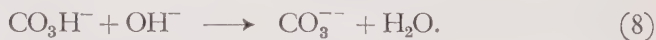
FASS (1923, p. 282); pour le lac de Zurich par L. MINDER (1943, p. 22); pour la mer Baltique par H. WATTENBERG (1936, p. 183).

Pour confirmer l'idée d'une précipitation organique du CO_3Ca , H. KLÄHN (1924, p. 809) cite le cas du lac de Sildemover (au sud de Rostock dans le Mecklenburg) où, d'après lui, l'absence d'algues ne permet pas la formation d'un dépôt calcaire bien que la dureté de l'eau du lac soit relativement élevée.

Par des séries d'expériences de laboratoire, des auteurs ont essayé de confirmer le point de vue de la précipitation organique du CO_3Ca . F. RUTTNER (1937, p. 72), par des mesures de conductibilité d'une solution de bicarbonate de calcium contenant des algues, a montré que la conductibilité de la solution diminuait avec le temps, donc qu'il se produisait une précipitation de CO_3Ca par les organismes. G. EHRKE (1934, p. 400) a mis en évidence la dépendance de l'assimilation (mesurée par la teneur en O_2) avec l'intensité lumineuse, la température et la teneur en CO_2 . R. MAUCHA (1927) estime qu'une augmentation de 10°C de la température (de 4° à 14°C) double la capacité d'assimilation du plancton. SVERDRUP, JONSTON et FLEMING (1942, p. 933) indiquent que le rapport du poids de CO_2 produit par la respiration du plancton divisé par le poids de CO_2 assimilé lors de la photosynthèse est de 10%.

Il résulterait de la théorie de la précipitation organique du CO_3Ca que ce sont les variations de la teneur en matière organique qui influencent les variations des concentrations en CO_2 . Ce sont donc des variations de la concentration de la matière organique que va dépendre en définitive, la précipitation du CO_3Ca . (Ces affirmations sont en opposition avec les résultats expérimentaux. Tableau 15, p. 54.)

La précipitation de CO_3Ca peut aussi résulter de l'action des bactéries sur la matière organique en décomposition, dans la mesure où elles produisent des substances qui modifient le pH de l'eau (C. R. BAIER, 1937, p. 85). La formation d'ammoniaque à partir de composés organiques favorise la formation d'ions CO_3^{--} d'après l'équation:



d'où la précipitation de CO_3Ca .

Parmi les facteurs inorganiques de la précipitation du CO_3Ca , il faut citer les échanges de CO_2 entre les surfaces d'eau et l'atmosphère. L'eau du lac de Neuchâtel, par exemple, est une eau sursaturée en CO_2 . Le brassage de l'eau par l'action du vent facilite l'établissement d'un équilibre entre le CO_2 contenu dans l'eau et celui contenu dans l'air. Pour les ri-

vières, la présence de chutes d'eau favorise la formation d'un équilibre entre le CO_2 contenu dans l'eau et celui contenu dans l'air. L'exemple de l'Aller est bien connu. Les chutes le long du parcours de la rivière produisent un départ de CO_2 de l'eau, donc une précipitation de CO_3Ca et une diminution de la dureté.

L. W. COLLET (1925, p. 271) estime que la précipitation du CO_3Ca dépend

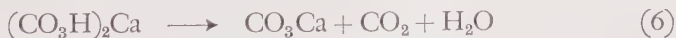
- 1° de l'échauffement de l'eau;
- 2° de l'évaporation;
- 3° du mouvement de l'eau.

De ces trois causes, dit-il, la première est sans doute la plus importante. L'eau s'échauffe et produit le départ du CO_2 . S. GRIPENBERG (1934, p. 180) a remarqué que « la basse température de l'eau en hiver accroît la solubilité du CO_3Ca ». Quant à l'évaporation, elle est considérée par H. KLÄHN (1923, p. 296) comme une cause secondaire de précipitation. A. HOOK (1937, p. 784) indique même que la perte en eau due à l'évaporation, est sans influence sur la concentration en CO_3Ca de l'eau.

D'après ces données, une précipitation inorganique de CO_3Ca est influencée principalement par une élévation de la température de l'eau, l'évaporation et le mouvement de l'eau ne jouant qu'un rôle secondaire ou négligeable (comparer avec les résultats expérimentaux, p. 71).

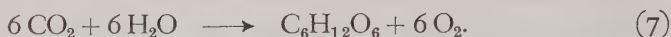
Il est très probable qu'à part de rares exceptions, la précipitation de CO_3Ca est due simultanément à des facteurs organiques et inorganiques. J. JOHNSTON et E. D. WILLIAMSON (1916, p. 729) ont montré qu'à côté de la précipitation organique prédominante, d'autres facteurs affectent directement la solubilité du CO_3Ca .

Différents auteurs ont montré par des analyses de l'eau d'un lac et des expériences de laboratoire, les possibilités de formation de CO_3Ca par l'activité du phytoplancton et par des modifications des conditions physiques de l'eau. Cependant aucun auteur n'a donné pour un lac déterminé une méthode permettant d'estimer la part du CO_2 qui est assimilé sous forme de matière organique par rapport à celle libérée par la formation de CO_3Ca . Pourtant l'estimation de ce rapport est une opération très simple. En ne considérant que la matière organique formée dans le lac, on peut établir lors de la décomposition du bicarbonate de calcium un bilan comparé



entre le poids de carbone qui est sous forme de CO_2 et celui qui est contenu dans le CO_3Ca formé par précipitation. Si la précipitation est due à l'assi-

milation de CO_3 par le phytoplancton, tout le CO_2 contribue à former de la matière organique



Comme il ne se produit pas de variations sensibles de la teneur en matière organique dans l'eau du lac, d'une année à l'autre, la matière organique doit se déposer et former une partie du sédiment. Si cette matière organique n'était pas oxydée (elle l'est en partie) on trouverait dans les sédiments une quantité égale de carbone sous forme de CO_3Ca et de carbone sous forme de matière organique. Le rapport:

$$R_C = \frac{\text{Poids de carbone contenu dans la matière organique}}{\text{Poids de carbone contenu dans le } \text{CO}_3\text{Ca}} \quad (8)$$

(pour un même poids de sédiment) serait égal à 1. Dans un lac oligotrophe comme le lac de Neuchâtel, ce rapport est nettement plus petit que 1.

$$R_C = \frac{0,55}{8,4} = \frac{1}{15}.$$

Pour le lac de Neuchâtel voir analyses à la page 79.

La présence d'oxygène dans les couches profondes du lac produit l'oxydation de la matière organique suivant l'équation:



Le rapport R_C étant très petit pour le lac de Neuchâtel, on en déduit que la réaction symbolisée par l'équation (10) est très importante. Il se forme donc dans le lac une grande quantité de CO_2 par la décomposition de la matière organique. Ce CO_2 diffuse du fond du lac vers la surface où il sera employé par la photosynthèse. L'oxydation de la matière organique entre en concurrence avec la décomposition du bicarbonate de calcium pour fournir le CO_2 assimilé par le phytoplancton. Mais au point de vue du bilan, cette décomposition du bicarbonate de calcium devient une réaction secondaire quant à la production du CO_2 .

Pour le lac de Neuchâtel, seule une petite partie du CO_3Ca peut être due à une précipitation organique. Au point de vue du processus de la précipitation du CO_3Ca , on ne peut cependant pas certifier que l'assimilation par le phytoplancton d'une partie du CO_2 ait produit la précipitation du CO_3Ca .

Il faut donc rechercher d'autres hypothèses pour expliquer la précipitation de la plus grande partie du CO_3Ca .

On a pensé jusqu'à maintenant, qu'un seul facteur suffirait à déterminer la précipitation complète d'au moins une partie du CO_3Ca . Or, il est tout aussi probable que plusieurs facteurs peuvent se succéder chronologiquement et jouent chacun un rôle dans la précipitation. Par exemple, l'un d'eux produit la précipitation proprement dite du CO_3Ca et un autre se charge, après coup, d'éliminer le CO_2 formé. Nous établirons par la suite quel est l'ordre d'action des différents facteurs (voir p. 57). Nous serons amenés à préciser un mécanisme nouveau de la précipitation du CO_3Ca qui ne sera pas compatible avec la théorie de la précipitation organique. Il permettra de montrer que la précipitation du CO_3Ca résulte de la formation et du mélange de couches d'eau.

Il nous faut tout d'abord préciser quelques données concernant la thermique et la chimie de l'eau du lac de Neuchâtel. Pour comprendre plus intimement le phénomène de la précipitation, nous avons introduit en plus de la mesure de la température et des analyses du CO_2 , des bicarbonates et de la matière organique, *le dosage du CO_3Ca en suspension dans l'eau du lac.*

Il est indéniable que le processus de la précipitation est influencé par les formes géométriques du lac (en particulier par la profondeur) et par la composition chimique des eaux du lac et des affluents. L'étude du mécanisme de la précipitation du CO_3Ca dans le lac de Neuchâtel revêt cependant une importance d'ordre général et ceci est dû au fait que ce lac représente le type du lac oligotrophe calcaire (définition p. 9). Il est donc un des lacs pour lesquels le phénomène de la précipitation du CO_3Ca à partir des bicarbonates dissous peut être étudié avec le plus de netteté, l'observation n'étant pas gênée par la présence en suspension dans l'eau, d'une quantité importante de matière organique et d'un abondant matériel silico-argileux.

1. Données bibliographiques sur la thermique d'un lac et les analyses chimiques de l'eau du lac de Neuchâtel

La connaissance de la thermique d'un lac revêt au point de vue limnologique un grand intérêt. Il a donc semblé utile de rassembler quelques données d'ordre général et d'introduire, grâce aux nombreuses mesures de A. QUARTIER, l'idée d'une oscillation périodique de la profondeur à laquelle se trouve la couche de saut thermique.

a) *Thermique d'un lac*

Le lac reçoit de la chaleur du soleil. L'énergie perdue par réflexion à la surface de l'eau a été évaluée à 7% de l'énergie incidente (E. STENZ, 1938, p. 14). L'intensité de la radiation solaire pour différentes profondeurs, déterminée au moyen d'une pile thermoélectrique de MOLL, est, d'après STENZ (1938, p. 8), pour le lac de Wigry (Pologne) la suivante:

Profondeur	0 m	0,5 m	1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m
Radiation solaire	100%	55%	35%	18%	10%	6%	3,7%	2,0%	1,5%	1,0%

F. SAUBERER et O. ECKEL (1936, p. 257) ont mesuré la répartition spectrale de la lumière qui a traversé différentes épaisseurs d'eau.

La faible conductibilité thermique de l'eau empêche le réchauffement des couches profondes du lac. Il s'y forme une stratification thermique de l'eau. On distingue trois zones:

- 1° La zone supérieure, appelée épilimnion;
- 2° la zone inférieure ou hypolimnion;
- 3° la zone intermédiaire ou *Sprungschicht* est caractérisée par un brusque saut de température. Elle est appelée en français «couche de saut thermique» par O. RIVIER (1937, p. 136).

Toute la thermique d'un lac est basée sur la notion de maximum de densité de l'eau (W. A. COLLET, 1925, p. 115). Pour un lac ayant une concentration saline homogène, la température décroît généralement, de la surface du lac jusqu'à une profondeur où elle est égale à 4° C. Les inversions de température ne sont que des phénomènes passagers. Pour des lacs du Congo belge, H. DAMAS (1937, p. 59), et pour le lac Ritom, L. W. COLLET (1925) ont constaté une inversion de température permanente, explicable par une modification de la densité due à une différence de concentration de l'eau en sels dissous.

Les échanges calorifiques entre la couche supérieure et les couches inférieures dépendent étroitement de la nature des vents qui soufflent sur le lac (W. HALBFASS, 1924, p. 116).

Des mesures thermiques effectuées sur les lacs de Neuchâtel et de Morat par A. QUARTIER (1947, p. 51) ont montré que, contrairement à ce que l'on pense, un petit lac s'échauffe beaucoup moins qu'un grand. Les effets du vent sont beaucoup plus sensibles sur l'étendue d'un grand lac que sur celle d'un petit lac. Les vagues d'un petit lac étant plus faibles que celles d'un grand lac, les courants de retour sont moins prononcés, la chaleur

emmagasinée dans les couches supérieures n'est donc pas véhiculée aussi profondément dans un petit lac que dans un grand.

Les variations de la forme de la couche de saut thermique permettent de comprendre le processus des échanges calorifiques entre l'eau de surface et celle de profondeur. Elles ne sont pas sans rapport avec la profondeur d'un lac. Dans un lac petit et peu profond, la couche de saut thermique est par exemple plus nette que dans un grand lac profond (E. M. KINDLE, 1929, p. 153).

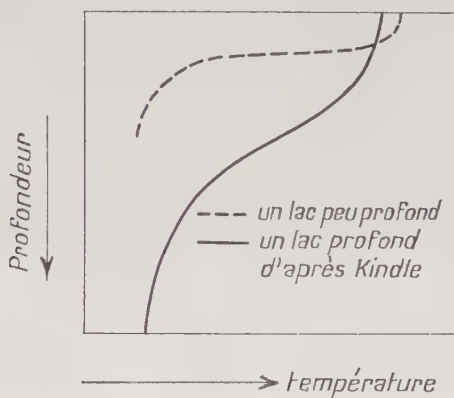


Figure 3

Couches de saut thermique.

Pour le lac Wigry (profondeur 50 m), la couche de saut thermique est comprise entre 2 et 5 m (M. STANGENBERG, 1935, p. 213). K. BUCH (1945, p. 193) indique pour la mer Baltique, comme profondeur de la couche de saut thermique, 15 à 25 m. Au mois d'août, pour le lac de Morat (profondeur 43 m), elle est comprise entre 5 et 20 m; pour le lac de Neuchâtel (profondeur 150 m) entre 5 et 30 m (A. QUARTIER, 1947, p. 52). Les mesures de W. et H. SCHMASSMAN (1948, p. 23) dans le lac de St-Moritz (profondeur 42 m) au mois d'octobre ont mis en évidence une couche de saut thermique à la profondeur de 30 à 32,5 m.

La profondeur à laquelle se trouve la couche de saut thermique varie avec la saison. H. BACHMANN (1931, p. 39) a étudié ce phénomène pour le Rotsee. Pour le lac de Neuchâtel, des mesures journalières effectuées pendant trois ans par A. QUARTIER (Inspectorat de la Chasse et de la Pêche) montrent que la couche de saut thermique varie entre 5 m au printemps

et 30 m en automne. Dans le courant de l'année, la couche de saut thermique s'enfonce dans le lac.

L'étude minutieuse de la variation de la température avec la profondeur, dans le lac de Sakrow (profondeur 43 m) près de Potsdam, par L. MÖLLER (1933, p. 207) a permis de distinguer nettement, à une date déterminée, trois couches de saut thermique qui se succèdent les unes au-dessous des autres. Cette constatation met bien en évidence la chute dans le lac, de la couche de saut thermique, et la formation près de la surface d'une nouvelle couche qui, à son tour, s'enfonce dans le lac.

La coexistence de deux ou plusieurs couches de saut thermique dans le lac de Neuchâtel n'a pas encore été démontrée. Par contre, des mesures, effectuées jour après jour par A. QUARTIER, montrent d'une façon très précise que la couche de saut thermique ne s'enfonce pas dans le lac avec une vitesse uniforme. La profondeur à laquelle se trouve la couche de saut thermique augmente, puis diminue dans l'espace de quelques jours. Il s'agit d'une variation périodique. Du mois d'avril au mois d'octobre, la période d'oscillation de la couche de saut thermique (pour une profondeur déterminée) est de 3 à 4 jours.

Un exemple concret est donné par la figure suivante qui représente les différentes positions de la couche de saut thermique dans le lac de Neuchâtel, les 26, 28 et 30 septembre 1950, la durée d'oscillation étant de 4 jours.

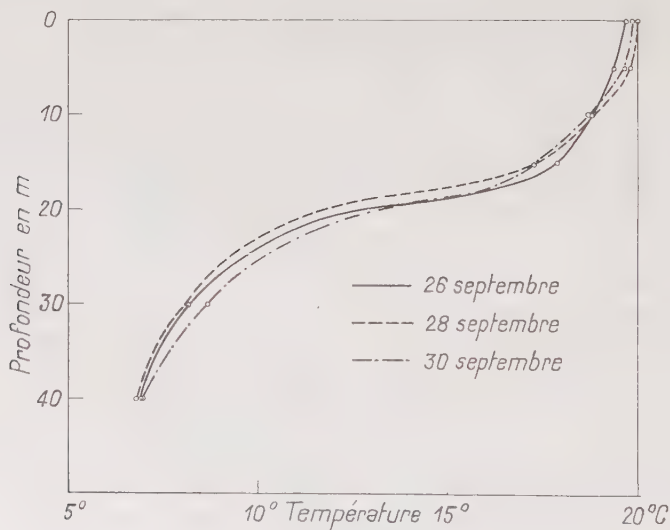


Figure 4

La profondeur à laquelle se trouve la couche de saut thermique a diminué entre le 26 et le 28 septembre. Elle a augmenté entre le 28 et le 30 septembre pour reprendre le 30 une position qui se rapproche de celle du 26. Le mouvement de mélange de couches d'eau est mis en évidence par la forme des courbes. L'eau qui a été chauffée en surface du 26 au 28 septembre s'est mélangée avec de l'eau plus profonde entre le 28 et le 30 septembre. Le tableau suivant donne le nombre des oscillations de la profondeur de la couche de saut thermique pendant un mois (les valeurs sont des moyennes pour les années 1943, 1944 et 1945):

Janvier	0	Juillet	9
Février	0	Août	9
Mars	1,5	Septembre	7
Avril	7	Octobre	9
Mai	7,5	Novembre	4
Juin	9	Décembre	0

Il faut encore remarquer que pour une même profondeur, les variations de température d'un jour à l'autre sont plus accentuées en profondeur qu'en surface (A. QUARTIER, 1947, p. 48).

En réduisant à deux heures le temps séparant deux mesures thermiques, on observe aussi des variations de température plus grandes en profondeur qu'en surface.

Des mesures thermiques journalières ont été entreprises par M. AUERBACH (1934) et J. SCHMALZ (1934) pour le Gnadensee (près de Constance); par H. MICOLETZKY (1910, p. 515) pour le Faistenauer Hintersee (près de Salzbourg); par M. GIEYSZTOV (1934, p. 130) pour les petits lacs du Suwałki (Pologne).

Pour le lac de Neuchâtel, des mesures faites par A. QUARTIER montrent qu'à 15 m de profondeur, il peut se produire dans un intervalle de temps de une heure des variations de température de 2° C. Notons en passant que le maximum de la température de l'eau de surface est atteint à 18 h et que le minimum de température se produit à 5 heures.

On peut déduire de ces observations que les variations de la profondeur de la couche de saut thermique peuvent être représentées par une courbe qui exprime la somme de trois phénomènes:

- 1° Enfoncement de la couche de saut thermique du printemps à l'automne.
- 2° Variations périodiques de la profondeur de la couche de saut thermique autour d'une position d'équilibre. Ce phénomène est dû au brassage de l'eau résultant de l'action du vent sur le lac.
- 3° Influence due au refroidissement et à l'échauffement journalier de l'eau de surface.

Les variations de température de l'eau influencent directement la concentration en sels dissous dans l'eau. A la chute brusque de température de la couche de saut thermique correspond une augmentation de la concentration de l'eau en sels dissous, en particulier des concentrations en bicarbonates et en CO_2 libre, qui dépendent étroitement de la température. Cette constatation a permis à STUNDL (1941, p. 70) de mettre en évidence ce qu'il appelle une «*Sprungschicht chimique*».

Par ces simples considérations, on voit déjà l'importance que peut avoir la connaissance de la thermique d'un lac, pour expliquer les phénomènes chimiques qui s'y produisent.

b) *Analyses chimiques de l'eau du lac de Neuchâtel*

Les analyses chimiques de l'eau du lac de Neuchâtel sont relativement peu nombreuses. A part quelques prélèvements isolés de MONIER (1901) et ZENDER (1906), une étude systématique de la variation de la composition chimique de l'eau dans le courant de l'année n'a été entreprise que par MOSER pour la région de Grandson et par SOLLBERGER pour celle de Neuchâtel.

Ces études avaient pour but de déterminer l'emplacement des stations de pompages d'eau pour les villes d'Yverdon et de Neuchâtel.

Les résultats de ces analyses sont donnés dans le tableau 13 (page 40).

Ces valeurs montrent que:

- 1° Quel que soit le lieu de prélèvement, la valeur moyenne du résidu sec est toujours la même;
- 2° la valeur de la dureté temporaire de l'eau des zones profondes du lac est comprise entre 135 et 145 mg $\text{CO}_3\text{Ca/l}$;
- 3° le rapport des concentrations $[\text{Ca}^{++}]:[\text{Mg}^{++}] = 5$;
- 4° la teneur en CO_2 libre est en moyenne de 5 mg/l.

2. Partie expérimentale.

Mesure de la température et analyses chimiques de l'eau

Les travaux de O. FUHRMANN (1900, p. 86 à 99), de A. MONARD (1919, p. 1 à 176) et surtout de H. ROBERT (1921, p. 92) ont mis en évidence le fait que la répartition horizontale du plancton dans l'eau du lac de Neuchâtel est uniforme pour des stations de prélèvements très éloignées les unes des autres.

Ces conclusions ont été vérifiées pour le lac de Morat par O. RIVIER (1937, p. 147).

Nos mesures de la conductibilité et de la teneur en CO_3Ca en suspension ont permis de vérifier l'homogénéité de la composition chimique de l'eau du lac de Neuchâtel pour une profondeur déterminée. Quatre séries de prélèvements furent effectués presque simultanément, aux stations 1 et 2; 2 et 3; H, A, I; 3, E, F (les stations de prélèvement sont indiquées dans la figure 13, p. 78). Il résulte de ces constatations que, sauf pour la région littorale, la situation du lieu de prélèvement ne joue pas un rôle important quant à la composition chimique et la thermique de l'eau. Les prélèvements dont il sera parlé ultérieurement furent effectués aux trois endroits suivants:

- 1° A la station de pompage de la ville de Neuchâtel (ouest de la ville), à 475 m du rivage, à une profondeur de 53 m;
- 2° au port de Neuchâtel, à 300 m devant l'entrée du port;
- 3° au port de Serrières, à 2,5 km devant Serrières (voir figure 13, p. 78).

Les prises d'eau ont été effectuées au moyen de l'appareil de la maison Friedinger de Lucerne, mis à notre disposition soit par le Laboratoire cantonal de chimie, soit par l'Inspectorat de la Chasse et de la Pêche.

Pour expliquer le mécanisme de la précipitation du CO_3Ca dans le lac de Neuchâtel, il nous a paru nécessaire de déterminer, en fonction du temps, les variations de:

- 1° La température;
- 2° la dureté temporaire;
- 3° la teneur en CO_3Ca en suspension;
- 4° la teneur en CO_2 libre;
- 5° les variations de la concentration en matières organiques.

a) Mesures de la température

La température a été mesurée au moyen d'un thermomètre à mercure à renversement, étalonné au préalable (1 division de l'échelle correspond à 0,2° C).

b) Dosage de la dureté temporaire

La valeur de la dureté temporaire de l'eau a été déterminée par la mesure de la conductibilité de l'eau. E. WASMUND (1930, p. 124) montre que la valeur de la conductibilité est proportionnelle au poids de la substance dissoute. Les erreurs commises avec une telle approximation ont été estimées par NÜMANN (1936, p. 693) au-dessous de 1%.

Nous avons montré que pour le lac de Neuchâtel, le rapport entre la conductibilité et la dureté temporaire est une constante (l'erreur quadratique moyenne est inférieure à 0,5%).

c) Dosage du carbonate en suspension

Pour estimer la quantité de matières en suspension dans l'eau, on emploie assez fréquemment, en limnologie, les données de la transparence, mesurée au moyen d'un disque de SECCHI. Si ces mesures donnent une idée de la concentration des matières en suspension dans l'eau, elles ne permettent en aucun cas d'en connaître la répartition en fonction de la profondeur.

Le dosage du plancton a été entrepris par J. KRIZENECKY (1943, p. 48) de la façon suivante: l'eau est centrifugée, le plancton se rassemble dans la partie graduée du tube; on mesure le volume du plancton ainsi déposé. Le désavantage de cette méthode est que le volume mesuré dépend étroitement des conditions de la centrifugation.

E. HEINEMANN (1936, p. 7) mesure la quantité de matière en suspension dans différents échantillons d'eau, au moyen d'un colorimètre de LANGE. Des mesures effectuées par cette méthode dans les lacs de la Prusse orientale indiquent une répartition homogène de la matière en suspension de la surface au fond du lac.

Le trouble de l'eau est dû d'après ce même auteur:

- 1° A des poussières (alluvions) CO_3Ca en suspension;
- 2° au plancton vivant;
- 3° au plancton mort;
- 4° à des floculations de substances colloïdales.

RUTTNER et SAUBERER (1938, p. 405) montrent que l'opacité due au plancton et aux autres substances en suspension dans l'eau varie comme la concentration en plancton. Ils emploient pour déterminer la quantité totale de matières en suspension un ingénieux dispositif qui permet la mesure directe de l'opacité de l'eau. Il s'agit d'un appareil que l'on immerge dans le lac. Il est formé d'une ampoule électrique et d'une cellule photoélectrique située à une distance de 1 m de l'ampoule. Plus la quantité de matière en suspension est grande, plus le courant électrique fourni par la cellule est petit. La part de CO_3Ca formant la matière en suspension n'est pas connue. Cette méthode photoélectrique ne permet donc pas de se rendre compte de la concentration en CO_3Ca en suspension de l'eau du lac, le plancton formant probablement la plus grande partie de la matière en suspension.

La mesure directe du CO_3Ca n'a, à notre connaissance, jamais été effectuée. Nous avons employé pour cette détermination la méthode suivante:

- 1° Séparation de la matière en suspension de l'eau du lac;
- 2° dosage du CO_3Ca contenu dans la matière en suspension.

La matière en suspension est précipitée par centrifugation. Elle adhère sur le fond du tube de centrifugation, puis l'eau est évacuée par décantation.

Le dosage se fait par l'action d'une solution d' HCl $n/100$ sur la matière en suspension, puis par titrage en retour, par conductimétrie, au moyen d'une solution de NaOH $n/100$ (CHARLOT et BEZIER, 1945, p. 156).

Cette méthode nécessite, pour chaque essai, la centrifugation pendant 30 minutes, à 2000 t/min., de 150 à 300 cm^3 d'eau. Elle permet d'identifier des quantités de CO_3Ca en suspension, avec une erreur de 0,03 mg $\text{CO}_3\text{Ca}/\text{l}$.

d) Dosage du gaz carbonique libre

Le dosage du CO_2 libre contenu dans l'eau du lac doit se faire au lieu de prélèvement. La méthode employée est celle du *Manuel suisse des denrées alimentaires* (1939, p. 213). Elle consiste à titrer 100 ou 200 cm^3 d'eau du lac par une solution de NaOH $n/50$. Pour chaque échantillon d'eau considéré, il est effectué 2 ou 3 dosages. Cette méthode donne des résultats reproductibles, l'erreur entre les différents dosages étant de 5%.

A. KROGH (1904, p. 342) a montré qu'il est difficile de déterminer quelle est la valeur absolue de la teneur en CO_2 libre de l'eau. Il pense qu'en secouant l'eau avec de l'air, et en soumettant le gaz à l'analyse, on peut calculer la proportion de CO_2 contenu dans l'air et ensuite celle contenue dans l'eau, sans modifier l'équilibre.



Pour estimer la précision d'un dosage de CO_2 libre contenu dans une solution de $(\text{CO}_3\text{H})_2\text{Ca}$, J. F. REITH (1941, p. 474) emploie une méthode très ingénieuse. Une solution contenant un nombre égal de molécules de CO_3Ca et d' HCl est traitée par une quantité déterminée d' HCl ; il y a formation de CO_2 libre. On titre en retour par une solution de NaOH . Si la méthode de dosage du gaz carbonique libre est exacte, on obtient un nombre égal d'équivalents de NaOH et de HCl .

L'erreur absolue d'un titrage de CO_2 libre, tel que nous l'avons effectué pour l'eau du lac, est de l'ordre de 7% (correction à ajouter).

e) Matière organique

Nous sommes en présence du phytoplancton et du zooplancton, vivants ou morts, et des substances organiques dissoutes. La quantité de matière organique contenue dans l'eau est déterminée par oxydation au moyen d'une solution de MnO_4K *n*/100. La teneur en matière organique est exprimée en milligrammes de MnO_4K employé pour l'oxydation d'un litre d'eau. Cette quantité de permanganate dépend étroitement des conditions dans laquelle a été faite l'oxydation. C'est pour cette raison qu'il est difficile de déterminer exactement le rapport entre le poids de permanganate employé pour l'oxydation et le poids de matière organique oxydée (LECLERC, 1945, p. 219).

Nous nous sommes donc bornés à ne considérer que les variations de la concentration de la matière organique, sans en donner la valeur absolue.

Une distinction a été faite entre la matière organique totale contenue dans l'eau et la matière en suspension. Alors que J.-PH. BUFFLE (1940, p. 277) emploie pour la séparation de la matière en suspension, de la solution, un creuset filtrant en verre d'Iéna (de porosité G_3), il nous a été possible d'effectuer la séparation par centrifugation. La matière organique contenue en suspension dans l'eau du lac est séparée de la solution de la même manière que le CO_3Ca en suspension avant d'être dosée. Le mode de séparation étant le même dans les deux cas, il est donc possible de comparer les résultats de l'analyse de ces deux constituants de la matière en suspension.

**3. Variation en fonction de la profondeur de la température
et de la concentration des différents constituants de l'eau du lac**

Les données relatives à ces variations sont reproduites dans le tableau 14. Les graphiques correspondant se trouvent dans la figure 5. On verra dans l'ordre:

- a)* Les variations de la température en fonction de la profondeur.
- b)* Les variations de la dureté temporaire en fonction de la profondeur.
- c)* Les variations de la teneur du gaz carbonique en fonction de la profondeur.
- d)* Les variations de la teneur en matière organique en fonction de la profondeur.
- e)* Les variations de la teneur en CO_3Ca en suspension en fonction de la profondeur.

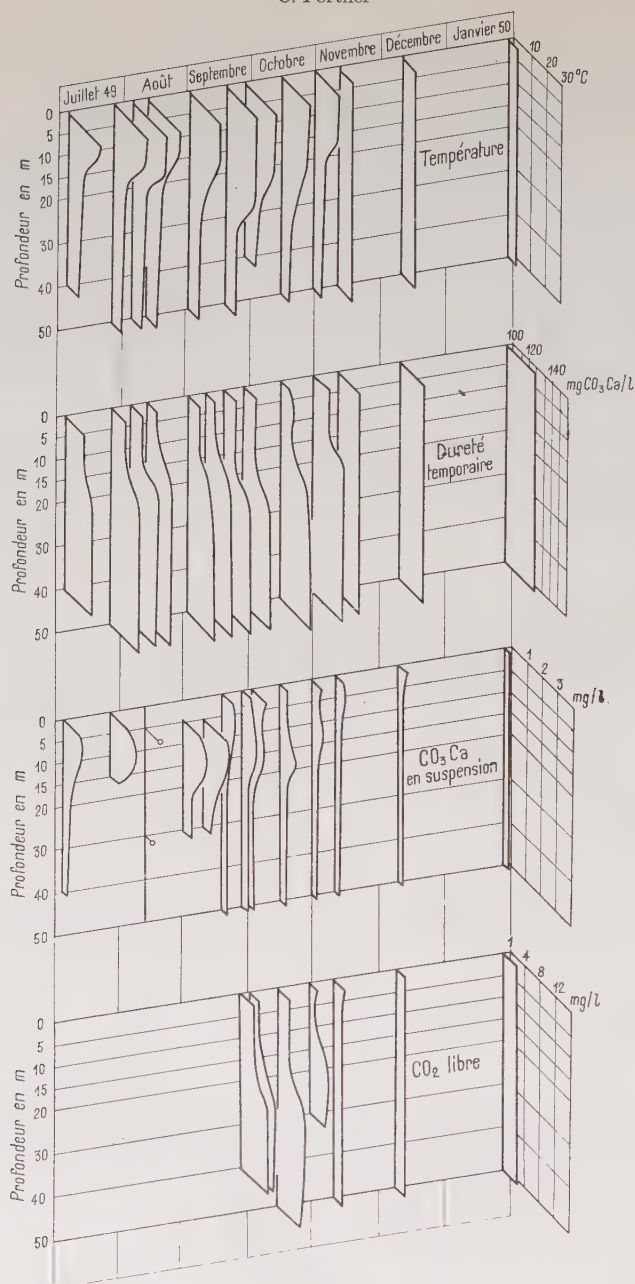


Figure 5

Analyses de l'eau du lac de Neuchâtel (juillet 1949 à janvier 1950)

Graphiques à 3 dimensions (Méthode O. JAAG). Verticalement sont reportées les valeurs de la profondeur du lieu de prélèvement, horizontalement les dates auxquelles ils furent effectués et en avant pour chacun des 4 graphiques, respectivement, les valeurs de la température, de la dureté temporaire, de la teneur en CO_3Ca en suspension, du CO_2 libre (valeurs: tableau 14, p. 46).

a) *Les variations de la température en fonction de la profondeur*

Les courbes *température-profondeur* sont différentes les unes des autres. Ces différences sont dues aux profondeurs variables auxquelles se trouve la «couche de saut thermique» et à sa netteté. La différence est particulièrement nette pour les courbes du 4 et du 11 août.

«La couche de saut thermique», après être descendue lentement jusqu'à 25 m de profondeur depuis le mois de juillet au mois de septembre, se trouve de nouveau à une profondeur de 15 m à la fin du mois d'octobre. Ceci est dû à une agitation très forte de l'eau, qui a provoqué un mélange dans le voisinage de la «couche de saut thermique». Or, c'est précisément pendant le mois d'octobre que les vents du nord-est (bise), qui soufflent dans le sens de la longueur du lac, sont fréquents, alors qu'ils l'étaient peu du mois d'avril au mois de septembre (EDM. GUYOT et J. PERRENOUD, 1949, p. 117).

La valeur élevée de la fréquence du vent sud-ouest (vent), en novembre, expliquerait la façon rapide dont est atteinte l'homogénéité de la température de l'eau pendant ce mois. En effet, le 3 novembre la température est à peu près homogène jusqu'à une profondeur de 50 m.

Ces quelques relations ont été mises en évidence uniquement pour montrer la possibilité d'une explication de la thermique du lac par une connaissance des conditions météorologiques.

b) *Les variations de la dureté temporaire en fonction de la profondeur*

La valeur de la dureté temporaire passe assez souvent par un maximum, pour des profondeurs un peu plus grandes que celles de la couche de saut thermique (voir les graphiques à la page 44). Ce phénomène n'est pas particulier au lac de Neuchâtel puisque des valeurs de la dureté temporaire correspondant à ce même type de courbe sont données dans le travail de H. HUBAULT (1943, p. 240) pour le lac de Nantua (en Savoie), et dans celui de MINDER (1923, p. 24) pour le lac de Zurich (courbes du 11 mai et du 6 juillet 1921).

Il existe un rapport étroit entre les *courbes température-profondeur* et *dureté temporaire-profondeur*. La valeur de la dureté temporaire augmentant avec la profondeur en même temps que la valeur de la température diminue.

Pour une profondeur dépassant 50 m, la composition chimique de l'eau du lac est remarquablement homogène au cours d'une année (139 ± 3 mg

[illegible]

Tableau 14

Analyses de l'eau du lac de Neuchâtel effectuées entre le 1^{er} juillet 1949 et le 21 mars 1950

Profondeur	12 20 septembre 1949 Station de pompage 14.45-16.15 h	13 26 septembre 1949 Port de Neuchâtel 9-11 h	14 28 septembre 1949 Port de Neuchâtel 8-11.30 h	15 30 septembre 1949 Port de Neuchâtel 9-11.30 h	16 13 octobre 1949 Port de Neuchâtel 8.30-10.30 h
m					
0,01					
0,1					
5	Température 19,1 115 0,5	Température 19,7 116 0,5	Température 20,0 114 1,0	Température 20,0 116 1,15	Température 18,0 108
10	Dureté temp. 18,8 114 1,2	Dureté temp. 19,4 115 0,75	Dureté temp. 19,8 116 0,7 3,1	Dureté temp. 19,7 116 1,1 2,0	Dureté temp. 18,0 108
15	CO ₃ Ca susp. 18,8 114 1,2	CO ₃ Ca susp. 18,8 115 0,9 3,1	CO ₃ Ca susp. 18,7 119 0,85 3,1	CO ₃ Ca susp. 18,7 118 0,8 2,7	CO ₃ Ca susp. 17,9 113 0,5 2,6
20	Température 12,8 131 0,9	Température 17,9 119 0,75 3,6	Température 17,3 124 0,65 5,1	Température 17,3 125 0,75 4,8	Température 17,9 117 0,5 2,3
30	Dureté temp. 8,9 136 0,8	Dureté temp. 12,8 132 0,55 6,7	Dureté temp. 11,6 134 7,3 3,3	Dureté temp. 12,5 135 0,5 6,6	Dureté temp. 16,2 122 1,0 3,3
40	CO ₃ Ca susp. 8,9 136 0,8	CO ₃ Ca susp. 12,8 132 0,55 6,7	CO ₃ Ca susp. 11,6 134 7,3 3,3	CO ₃ Ca susp. 12,5 135 0,5 6,6	CO ₃ Ca susp. 16,2 122 1,0 3,3
50	Température 6,7 137 0,4	Température 8,2 136 6,5 2,7	Température 8,2 137 6,8 2,3	Température 8,7 134 6,1 2,5	Température 13,4 134 0,45 6,6
60	Dureté temp. 6,1 137 0,5	Dureté temp. 6,9 137 0,45 6,3	Dureté temp. 6,1 139 0,3 6,1	Dureté temp. 7,9 136 0,3 6,0	Dureté temp. 14,1 141 0,45 7,0
70	CO ₃ Ca susp. 5,8 136 0,3	CO ₃ Ca susp. 6,3 2,3	CO ₃ Ca susp. 6,3 2,3	CO ₃ Ca susp. 6,3 2,3	CO ₃ Ca susp. 6,7 142 6,5 2,5
75	Température 5,7 136 0,2	Température 6,3 2,3	Température 6,3 2,3	Température 6,3 2,3	Température 6,7 142 6,5 2,5
100					
110					
8130					

Profondeur	17 28 octobre 1949 Port de Neuchâtel 8.30-10.30 h	18 9 novembre 1949 Serrières 8-10 h	19 8 décembre 1949 Serrières 8-10 h	20 27 janvier 1950 Serrières 8.30-10 h	21 15 mars 1950 Serrières 8.30-10 h
m					
0,01					
0,1					
5					
10					
15					
20					
30					
40					
50					
60					
70					
75					
80					
100					
110					
130					
	Température	Température	Température	Température	Température
	Dureté temp.	Dureté temp.	Dureté temp.	Dureté temp.	Dureté temp.
	CO ₃ Ca susp.	CO ₃ Ca susp.	CO ₃ Ca susp.	CO ₃ Ca susp.	CO ₃ Ca susp.
	CO ₂ libre	CO ₂ libre	CO ₂ libre	CO ₂ libre	CO ₂ libre
	Saturat. CO ₂	Saturat. CO ₂	Saturat. CO ₂	Saturat. CO ₂	Saturat. CO ₂
	Dureté temporaire en mg CO ₃ Ca/l				
	CO ₂ libre en mg/l				
	CO ₃ Ca en suspension en mg/l				
	Matière organique en mg MnO ₄ K/l				

CO₃Ca/l). KURT BUCH (1945, p. 194) avait fait une remarque analogue pour l'eau profonde (située au-dessous de la «couche de saut thermique») de la Baltique. On note cependant une légère fluctuation de la concentration en bicarbonate pour les eaux profondes. Vers la fin de l'été, lorsque l'épilimnion s'étend jusqu'à une profondeur de 25 m et qu'à ce niveau l'eau a une dureté temporaire minimum, l'eau des couches profondes du lac possède une dureté temporaire un peu supérieure à la moyenne annuelle.

c) Les variations de la teneur du gaz carbonique en fonction de la profondeur

La température influençant directement la solubilité du gaz carbonique, il est possible de distinguer, pour les *courbes gaz carbonique-profondeur*, une «Sprungschicht chimique». Pendant l'été où les fluctuations de température sont fréquentes, les minima de la teneur en gaz carbonique sont situés dans le voisinage de la couche de saut thermique. En hiver, lorsque la température est homogène dans tout le lac, il est possible de noter en surface une teneur en CO₂ légèrement inférieure à celle de la moyenne de l'eau du lac. D'après les courbes de MINDER (1943, p. 64), la teneur en CO₂ varierait dans de larges proportions jusqu'à une profondeur de 10 m, la teneur en CO₂ étant pratiquement nulle en surface. Nos mesures contredisent cette façon de voir. *Les valeurs de la concentration en CO₂ dans l'eau prélevée à 5, 0,1 et 0,01 m de profondeur, ne diffèrent que très peu les unes des autres.* Du même coup, il faut renoncer à démontrer par des dosages de CO₂ l'interprétation théorique de l'évasion dans l'air du CO₂ contenu dans l'eau.

D'après les mesures de H. SOLLBERGER (1946, p. 88), la teneur en CO₂ de l'eau du lac de Neuchâtel, à la profondeur de 40 m, ne subirait pas de fluctuations systématiques dans le courant de l'année. Il nous a cependant été possible, par des mesures un peu plus précises, de mettre en évidence une variation de la teneur en CO₂. Pour le mois de septembre et une partie du mois d'octobre, la teneur en CO₂ pour une profondeur de 40 à 50 m est comprise entre 6 et 7 mg/l. Pour les mois de novembre à mars, la teneur en CO₂ a diminué de moitié, elle est comprise entre 2 et 4 mg/l. Ce phénomène n'est pas particulier au lac de Neuchâtel puisque L. MINDER (1923, p. 24), pour le lac de Zurich, a obtenu des résultats d'analyses du CO₂ présentant les mêmes particularités, de mai à novembre la teneur en CO₂ étant de 6,6 à 8,6 mg/l, en décembre de 5,7 mg/l et en janvier de 4,7 mg/l.

Cette diminution de la teneur en CO₂ ne paraît, à première vue, pas normale puisqu'elle a lieu parallèlement à une baisse de la température. Il

semblerait donc qu'à une baisse de température correspondrait une baisse de la teneur en CO_2 quoique la solubilité du CO_2 augmente lorsque la température diminue.

Il faut donc considérer le problème sous un autre angle. On peut supposer que l'eau du lac est formée de deux liquides non miscibles, dont la zone de séparation est «la couche de saut thermique». La quantité de CO_2 contenue dans le lac tout entier, se répartit entre les deux liquides suivant la loi de distribution de NERNST. La solubilité dans l'épilimnion est plus faible que celle de l'eau de l'hypolimnion. En hiver, lorsque le lac a une température homogène, la quantité de CO_2 est répartie d'une façon uniforme dans tout le lac. Il en résulte par rapport à l'été une augmentation de la solubilité dans l'épilimnion et une diminution dans les couches inférieures du lac.

Cette conception de la répartition d'une substance entre les couches supérieures et les couches profondes du lac permet une meilleure interprétation des résultats des analyses limnologiques. Elle s'applique, par exemple, d'une façon tout aussi précise au problème des variations de la solubilité du bicarbonate de calcium.

Si l'on considère le problème du mélange de deux quantités d'eau saturée de CO_2 à des températures différentes, le mélange de ces deux quantités d'eau produit un dégagement de CO_2 . Pour les concentrations en CO_2 dissous dans l'eau du lac, un mélange d'eau de températures différentes ayant le même degré de saturation en CO_2 produit une eau ayant un degré de saturation supérieur (explication à la page 66).

d) Les variations de la teneur en matière organique en fonction de la profondeur

La courbe *matière organique-profondeur* n'a pas de forme caractéristique (page 55). La teneur en matière organique de l'eau varie assez peu avec la profondeur. Il est donc impossible de distinguer au moyen de cette courbe une «Sprungschicht chimique».

e) Les variations de la teneur en CO_3Ca en suspension en fonction de la profondeur

Les courbes *carbonate de calcium en suspension-profondeur* ne permettent pas d'identifier une «Sprungschicht chimique». Elles présentent un maximum de la teneur en CO_3Ca qui ne se trouve généralement pas situé dans le voisinage immédiat de la surface. Une telle constatation est en accord avec les

résultats obtenus pour le dosage du CO_2 . La vitesse de chute des petites particules de calcite étant très faible (de l'ordre de 10 cm/h), la zone de concentration maximum de CO_3Ca en suspension correspond approximativement à la zone de précipitation la plus importante du CO_3Ca . Elle est située, dans la plupart des cas, légèrement au-dessus de la « couche de saut thermique ». Notons encore la rapide diminution de la teneur en CO_3Ca en suspension avec la profondeur.

4. Etude des variations de la température et des concentrations des corps contenus dans l'eau du lac en fonction du temps

Pour mettre en évidence le mécanisme de la précipitation du CO_3Ca , il faut montrer les relations qui existent entre les concentrations des différents corps dissous et l'influence de la température sur la concentration de ces derniers.

En comparant, pour un prélèvement donné, les courbes température-profondeur, dureté-profondeur, CO_2 -profondeur, CO_3Ca en suspension-profondeur, matière organique-profondeur, il est possible de se faire une première idée des relations existant entre les différents composants de l'eau. Les variations de concentration de chacun des corps dissous dans l'eau du lac joue pour l'interprétation du mécanisme de la précipitation du CO_3Ca un rôle au moins aussi important que la valeur absolue de la concentration. Il nous a donc semblé nécessaire d'employer une méthode qui consiste à comparer les variations de la température et de la concentration des corps dissous entre deux prélèvements effectués à des dates différentes. Il est possible ainsi de se rendre compte si, par exemple, à une augmentation de la température, correspond une augmentation ou une diminution de la dureté temporaire.

L'examen des variations avec le temps des concentrations des corps peut être fait au moyen des diagrammes de O. JAAG. Mais nous avons préféré employer une méthode de représentation un peu moins élégante, mais beaucoup plus précise. Les courbes des analyses de chaque prélèvement sont dessinées sur une feuille de papier semi-transparent. La superposition des différentes feuilles permet de connaître aussitôt les variations de chacun des constituants.

Une telle méthode doit être employée avec discernement, en particulier lorsqu'il s'agit d'un phénomène tel que la précipitation du CO_3Ca . La durée entre deux prélèvements joue un rôle prédominant pour déterminer la valeur des résultats obtenus par cette méthode. En supposant que le

phénomène à étudier se produise dans un temps relativement court, la durée entre deux prélèvements doit être courte, c'est-à-dire de l'ordre de grandeur de celle du phénomène à étudier. Si, par exemple, pour l'étude du phénomène de la précipitation du CO_3Ca , on étend la durée entre deux prélèvements à six mois, on perd l'interprétation du mécanisme du phénomène à étudier pour ne donner qu'une idée des variations saisonnières. Dans le cas extrême de deux dosages, l'un en hiver, l'autre en été de l'année suivante, on peut dire qu'à une augmentation de la concentration de la matière organique correspond une diminution de la teneur en $(\text{CO}_3\text{H})_2\text{Ca}$ et une augmentation de la teneur en CO_3Ca en suspension. Il n'est pas certain pour une durée plus courte entre deux prélèvements, qu'à une augmentation de la teneur en matière organique corresponde une diminution de la teneur en bicarbonates (voir figure 6).

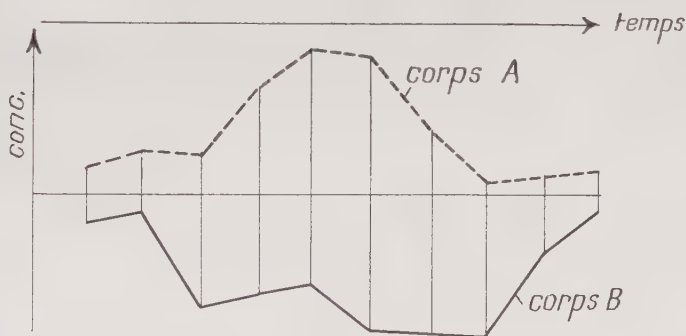


Figure 6

----- corps A ——— corps B

Variation de même sens des concentrations des corps A et B si l'on considère un intervalle de temps d'une unité. Variation de sens contraire pour un intervalle de trois ou quatre unités.

5. Relation entre la teneur totale en matière organique, la dureté temporaire, la teneur en CO_2 , la teneur en carbonate en suspension

Les valeurs de la teneur totale en matière organique d'échantillons d'eau prélevés à différentes profondeurs sont très semblables. La courbe *matière organique profondeur* n'ayant pas une forme caractéristique, il est impossible

de tirer des conclusions par simple comparaison avec celles de la dureté temporaire ou du CO_3Ca en suspension.

Par contre, une relation existe entre la variation de la teneur en matière organique et la variation de la dureté temporaire; cette variation est mise en évidence par la comparaison des résultats d'analyses chimiques de l'eau prélevée pendant les mois de juillet et d'août (période de la stagnation d'été). Pendant cette période, les concentrations des corps dissous ne subissent pas d'augmentations ou de diminutions systématiques. Il est donc justifié de comparer les variations des concentrations des différents corps dissous, quelle que soit la durée du phénomène de précipitation.

Tableau 15

Variations de la teneur en matière organique et de la dureté temporaire entre deux prélèvements

(a matière organique; b dureté temporaire; / = croissance; \ = décroissance; ○ = sans variations)

Date du prélèvement (1949)		5 m		10 m		15 m		20 m		25 m		30 m	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
4 juillet	25 juillet	\	\	/	\	/	/	/	/	/	/	/	/
4 juillet	11 août	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	○
4 juillet	29 août	\	\	\	\	/	\	/	/	/	/	/	/
25 juillet	11 août	\	\	\	○	\	\	\	\	\	\	\	\
25 juillet	29 août	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\	\
11 août	29 août	○	/	\	/	/	/	/	/	\	\	\	\

36 cas, dont 3 sans correspondances de variation. 26 variations dans le même sens, 7 variations en sens contraire.

Le tableau montre nettement que les variations de la teneur en matière organique et celle de la dureté temporaire se font dans le même sens. Les cas où la concordance n'existe pas sont ceux des régions de transition, c'est-à-dire des profondeurs pour lesquelles il y a renversement du sens de la variation. Pour ces profondeurs, les variations sont légèrement décalées l'une par rapport à l'autre (voir figure 7).

Nous montrerons dans le tableau 20 (page 68) que les variations de la dureté temporaire et de la teneur en CO_2 se font dans le même sens. Il existe donc une même correspondance entre les variations matière organique-dureté temporaire et matière organique-teneur en CO_2 . Il est ainsi possible de préciser que les variations de la teneur en matière organique et celles de la teneur en CO_2 se font dans le même sens.

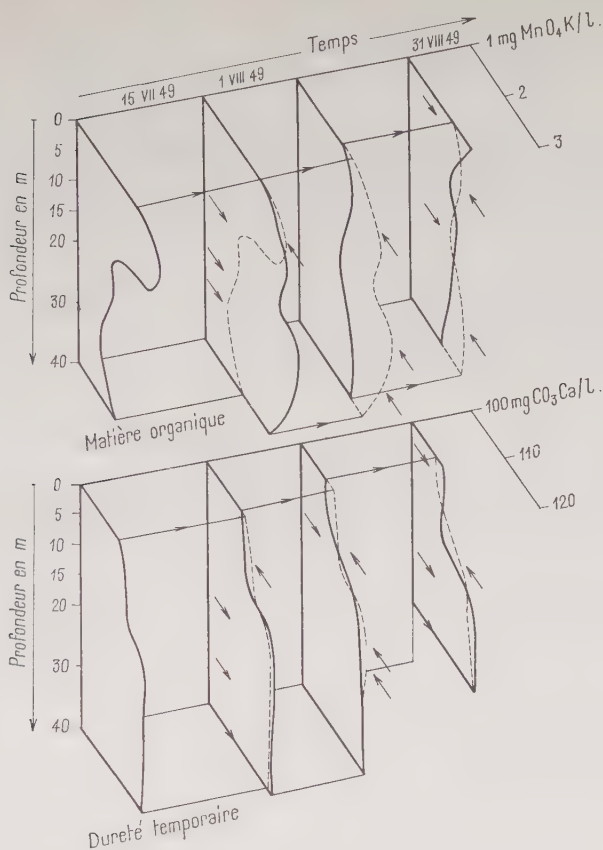


Figure 7

Relations entre la dureté temporaire et la teneur en matière organique de l'eau du lac

Ces graphiques à 3 dimensions représentent les résultats de 4 séries de prélèvements. Les valeurs de la profondeur du point de prélèvement sont reportées verticalement, les dates auxquelles ils furent effectués sont reportées horizontalement. Les valeurs de la dureté temporaire et de la teneur en matière organique sont reportées en avant. Les courbes en pointillés représentent les concentrations du corps considéré, lors du prélèvement précédent. Le sens des variations de la concentration entre deux prélèvements est donné par les flèches.

En comparant les variations de la teneur en matière organique et celles de la dureté temporaire, on remarque qu'elles se font le plus fréquemment dans le même sens (voir tableau 15, page 54).

Il existe aussi une relation entre les variations de la teneur en matière organique et la concentration du CO_3Ca en suspension. Ainsi, entre le 4 et le 25 juillet, il se produit une décroissance commune pour une profondeur de 5 m; à partir d'une profondeur de 15 m, il y a croissance parallèle.

Mais pour la profondeur de 10 m, il y a encore décroissance de la valeur de la dureté temporaire, alors que la teneur en matière organique croît déjà.

Le décalage est encore plus sensible lors de la comparaison des variations en matière organique avec celles du CO_3Ca en suspension.

1° Comparaison des diagrammes des 4 et 25 juillet 1949:

Diminution de la matière organique entre 7 et 0 m.

Diminution de la dureté temporaire entre 12 et 0 m.

Accroissement de la concentration du CO_3Ca en suspension de 21 à 0 m.

2° Comparaison des diagrammes du 25 juillet et du 11 août 1949:

Diminution de la teneur en matière organique entre 60 et 2 m.

Diminution de la dureté temporaire entre 60 et 0 m.

Augmentation de la teneur du CO_3Ca en suspension de 60 à 7 m.

Ces deux exemples confirment, dans une modeste mesure, que *la teneur en CO_3Ca en suspension croît, lorsque la teneur en matière organique décroît (et inversement).*

En résumé, nos résultats expérimentaux montrent qu'il existe entre les variations de la teneur en matière organique et celles de la teneur en CO_2 , de la dureté temporaire et du CO_3Ca en suspension, les correspondances suivantes:

A une augmentation de la teneur en matière organique correspondent:

1° Une augmentation de la teneur en CO_2 ;

2° une augmentation de la dureté temporaire;

3° une diminution de la concentration en CO_3Ca en suspension.

Ces relations sont incompatibles avec la théorie de la précipitation organique du CO_3Ca . En effet, si ce sont les variations de la matière organique qui influencent directement la précipitation ou la dissolution du CO_3Ca en suspension, on peut s'attendre à ce qu'à *une augmentation de la concentration de la matière organique correspondent:*

1° Une diminution de la teneur en CO_2 ;

2° une diminution de la dureté temporaire;

3° une augmentation de la concentration en CO_3Ca en suspension.

La nette opposition entre les correspondances des variations obtenues expérimentalement et celles qui découlent de la théorie de la précipitation organique du CO_3Ca , nous oblige à renoncer à cette théorie et à rechercher une autre explication de la précipitation du CO_3Ca . Puisque la précipitation du CO_3Ca ne dépend pas des variations de la teneur en matières organiques, on peut se demander la cause de cette précipitation. On remarque qu'elle est liée directement aux teneurs en CO_2 de l'eau. En renversant l'ordre d'importance des facteurs de précipitations on peut dire que c'est la teneur en CO_2 qui détermine à la fois la précipitation du CO_3Ca et le développement de la matière organique. Ceci explique que les variations de la teneur en matière organique et celles de la teneur en CO_2 se font dans le même sens. Il nous est dès lors facile d'expliquer les correspondances expérimentales que nous avons obtenues.

A une augmentation de la teneur en CO_2 correspondent :

- 1° Une augmentation de la teneur en matière organique;
- 2° une augmentation de la valeur de la dureté temporaire;
- 3° une diminution de la concentration du CO_3Ca en suspension.

Ces correspondances sont tout à fait équivalentes aux correspondances expérimentales données précédemment. Nous verrons par la suite (page 67) qu'elles ne sont pas quantitatives; elles permettent néanmoins de se faire une première idée claire de la précipitation du CO_3Ca .

Il ne faudrait pas déduire de cette nouvelle interprétation que la matière organique ne joue aucun rôle dans le mécanisme de la précipitation du CO_3Ca . Si elle n'est plus le facteur qui déclenche la réaction de la précipitation, son action n'est pas sans l'influencer directement. Par assimilation du CO_2 , les organismes agissent indirectement sur la précipitation et régularisent ainsi la teneur en CO_2 de l'eau. Dans le bilan de la précipitation, la matière organique vivante consomme une part non négligeable du CO_2 libéré par la formation du CO_3Ca .

Il est, par contre, impossible d'un jour à l'autre, de mettre en évidence une variation de la concentration en CO_2 due uniquement à l'assimilation par le plancton, la méthode de dosage du CO_2 n'étant pas suffisamment précise.

L'étude des relations entre la matière organique en suspension et le CO_3Ca en suspension ne semble pas apporter une contribution appréciable à l'explication de la précipitation du CO_3Ca . Il semblerait pourtant qu'il puisse exister une relation entre les variations de la concentration du plancton (matière organique en suspension) et celles de la teneur en CO_3Ca en

suspension. La comparaison des résultats de dosage de ces deux produits ne permet pas de trouver une correspondance simple entre leurs variations de concentrations.

Bien qu'il n'y ait pas d'analogies entre les variations de l'oxydabilité due à la matière organique totale et celle en suspension dans l'eau du lac, le rapport:

$$R_{mat. org.} = \frac{\text{oxydabilité due à la matière organique en suspension}}{\text{oxydabilité due à la matière organique totale}} \quad (12)$$

présente un certain intérêt au point de vue limnologique. Le tableau 16 résume les valeurs de ce rapport.

Tableau 16

Rapports entre l'oxydabilité due à la matière organique en suspension divisée par celle de la matière organique totale

Profondeur	<i>R_{mat. org.}</i>			
	4 juillet 1949	25 juillet 1949	11 août 1949	29 août 1949
0,1 m	0,13	0,25	0,25	—
5 m	0,09	—	—	0,28
10 m	0,10	0,14	—	0,25
15 m	0,08	0,12	—	0,19
20 m	—	0,13	—	0,24
25 m	—	—	—	—
30 m	0,13	0,12	—	0,14
40 m	0,15	0,17	0,18	0,16
Moyenne 0,17		Minimum 0,08	Maximum 0,28	

Ces rapports montrent qu'une part importante (plus des trois quarts) de l'oxydabilité de l'eau du lac est due à la matière organique dissoute et à celle, contenue en suspension, dont le diamètre est inférieur à 1μ . On ne peut malheureusement pas déduire de ce quotient de l'oxydabilité, le rapport des poids entre le plancton et la matière organique dissoute, la matière en suspension étant probablement moins oxydable que la matière organique dissoute.

Pour le lac Léman, ce rapport de l'oxydabilité a été mesuré par J.-PH. BUFFLE (1940, p. 279). Bien que la méthode de séparation de la matière en suspension ne soit pas identique à la nôtre, on peut calculer à partir des valeurs données par BUFFLE le rapport $R_{mat. org.}$ qui est égal à 0,14.

Ce résultat concorde avec la valeur obtenue pour le lac de Neuchâtel.

6. Etude du système $\text{CO}_2 - (\text{CO}_3\text{H})_2\text{Ca} - \text{CO}_3\text{Ca}$ d'après les analyses d'eau du lac de Neuchâtel

Les conditions qui provoquent la précipitation du CO_3Ca se produisent parce que le système considéré n'est pas un système en équilibre. Pour qu'un continuel déséquilibre ait lieu, il faut qu'il se produise périodiquement dans le lac, des modifications des conditions physiques. Comme il a été montré dans le chapitre de la thermique du lac (page 37), la température varie fortement dans le voisinage de la couche de saut thermique. Le mélange de couches d'eau produit à la fois une continuelle modification de la forme ainsi qu'une modification de la profondeur de la couche de saut thermique.

Une correspondance s'établit entre la forme de la courbe *température-profondeur* et les courbes *dureté temporaire-profondeur* et *teneur en CO_2 -profondeur*. On peut se demander alors, s'il n'en existe pas une entre les variations en fonction du temps de la température avec les concentrations en bicarbonates et celles en CO_2 . Si c'était le cas, on pourrait alors déduire que les facteurs qui produisent les variations de température, influent aussi directement les variations de la concentration en CO_2 et en $(\text{CO}_3\text{H})_2\text{Ca}$.

L'étude des relations des différents corps contenus dans l'eau et de la température comprend les points suivants:

- a) Relation de la température avec la dureté temporaire et la teneur en CO_2 .
- b) Correspondance entre la température et la dureté temporaire.
- c) Correspondance entre la température et la teneur en CO_2 .
- d) Relation entre la teneur en CO_2 , la dureté temporaire et la concentration en CO_3Ca en suspension.

a) *Relation entre la température et la dureté temporaire et la teneur en gaz carbonique*

Pour une profondeur déterminée, la valeur de la dureté temporaire ou de la teneur en CO_2 augmente fortement pour de petites variations de profondeur. Cette région est appelée par STUNDL (1941, p. 70) «*Sprungschicht chimique*». La profondeur de la *Sprungschicht chimique* est la profondeur pour laquelle la variation de la dureté temporaire ou de la teneur en CO_2 est la plus grande, pour une distance donnée.

Tableau 17

Profondeur de la couche de saut thermique et des «Sprungschichten chimiques»

Date (1949)	Couche de saut thermique	«Sprungschichten chimiques»	
		Dureté temporaire	Teneur en CO ₂
	m	m	
4 juillet	6	13	—
25 juillet	11	13	—
29 août	15	15	—
8 septembre	15	14	—
15 septembre	18	24	—
17 septembre	20	19	—
20 septembre	16	14	—
26 septembre	19	17	17
28 septembre	19	16	15
30 septembre	19	15	14
13 octobre	22	16	16
28 octobre	12	11	11

La correspondance est très bonne pour les valeurs de la dureté temporaire et la teneur en CO₂. Par contre, *il n'existe pas une relation précise entre les profondeurs de la couche de saut thermique et celles des «Sprungschichten chimiques»*.

b) Correspondance entre la température et la dureté temporaire de l'eau du lac

Par l'étude des variations de concentration des substances dissoutes, on peut rechercher s'il y a correspondance entre certaines variations de la température et de la dureté temporaire. (Voir la figure 8 et le tableau 18.)

La correspondance entre la variation de la température et celle de la dureté temporaire apparaît nettement. *La dureté temporaire varie le plus souvent dans le sens contraire de la température*. A une augmentation de la température correspond une diminution de la dureté temporaire et vice versa. Il en résulte que la variation périodique de la profondeur à laquelle se trouve la couche de saut thermique influe directement la variation de la profondeur de la *Sprungschicht chimique*. Ces conclusions peuvent être confirmées par l'existence d'une correspondance assez bonne entre la température et la dureté temporaire. Le calcul de la dureté temporaire en fonction de la température, n'est qu'une grossière estimation [voir l'équation (13), page 63]. Il existe, à part la température, beaucoup de causes influençant la solubilité du bicarbonate de calcium, parmi lesquelles nous citerons:

1° La variation durant l'année de la quantité totale de bicarbonates dissous. D'après l'estimation de la décalcification de l'épilimnion (voir

page 25), le lac aurait perdu à la fin de l'été, par rapport au début du printemps, environ le $1/33$ de sa quantité totale en bicarbonates ($60 \cdot 10^3$ t de CO_3Ca).

- 2° La dépendance entre la solubilité du bicarbonate et la teneur en CO_2 . La variation de la solubilité du bicarbonate de calcium pour une pression de CO_2 égale à 0,0003 atm (pression partielle du CO_2 dans l'air) a été déterminée par G. L. FREAR et J. JOHNSTON (1929, p. 2083).

Température	0°	10°	20°	25°	30°
Rapport de solubilité . . .	1,8	1,4	1,1	1,0	0,9

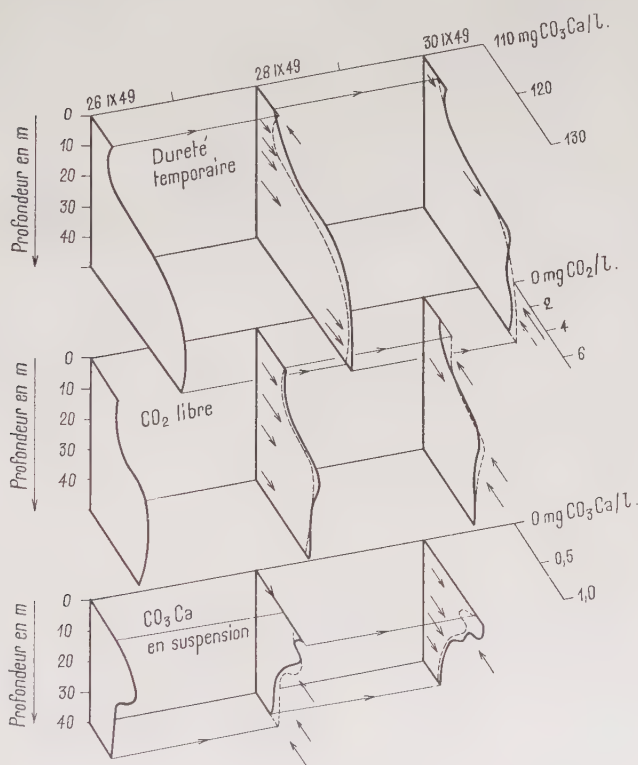


Figure 8

Relations entre la teneur en gaz carbonique, la dureté temporaire et le carbonate de calcium en suspension

Ces graphiques à 3 dimensions représentent les résultats d'analyses chimiques de l'eau du lac de Neuchâtel. L'eau a été prélevée lors de 3 séries de prélèvements. Les flèches indiquent le sens des variations des concentrations entre deux prélèvements.

En comparant les variations de la teneur en CO_2 et de la dureté temporaire, on voit que ces variations se font dans le même sens. Elles se font par contre en sens contraire de celles du carbonate de calcium en suspension (voir le tableau 20, page 68).

Tableau 18

Variations de la température et de la dureté temporaire entre deux prélèvements

(a température; b dureté temporaire; / = croissance; \ = décroissance; ○ = sans variations)

Date du prélèvement 1949-1950		0 m a b	5 m a b	10 m a b	15 m a b	20 m a b	30 m a b	40 m a b	60 m a b
4 juillet	25 juillet	-	/ \	/ \	/ \	/ \	/ \	/ \	-
25 juillet	28 juillet	-	○ ○	/ \	/ \	/ \	/ \	○ ○	/ \
28 juillet	29 juillet	-	/ \	/ \	/ ○	/ ○	/ \	-	-
29 juillet	4 août	-	/ \	/ \	/ \	/ \	/ ○	-	-
4 août	11 août	/ \	/ \	/ \	/ \	-	-	-	-
11 août	29 août	-	/ \	/ \	/ \	-	-	-	-
29 août	31 août	-	/ \	/ \	○ ○	-	-	-	-
31 août	8 sept.	/ \	/ \	/ \	/ ○	/ \	/ \	-	-
8 sept.	15 sept.	-	/ \	/ \	/ \	/ \	/ \	/ \	-
15 sept.	17 sept.	-	/ \	/ ○	/ \	/ \	/ \	-	-
17 sept.	20 sept.	○ ○	/ \	/ \	/ \	/ \	○ ○	-	-
20 sept.	26 sept.	/ \	/ \	/ \	/ \	/ \	/ \	○ ○	-
26 sept.	28 sept.	/ \	/ \	/ \	/ \	/ \	○ ○	○ ○	-
28 sept.	30 sept.	○ /	○ ○	○ \	○ ○	/ \	/ \	/ \	-
30 sept.	13 octobre	/ \	/ \	/ ○	/ \	/ \	/ \	-	-
13 octobre	28 octobre	/ \	/ \	/ \	/ \	/ \	/ \	-	-
28 octobre	9 novembre	/ \	/ \	/ \	/ \	/ \	/ \	-	-
9 novembre	8 décembre	/ \	/ \	/ \	/ \	/ \	/ \	-	-
8 décembre	27 janvier	/ \	/ \	/ \	/ \	/ \	/ \	/ \	/ \
27 janvier	15 mars	/ ○	/ ○	/ ○	/ ○	/ ○	/ ○	-	-

116 cas, dont 10 sans variations. 86 variations en sens contraire, 8 variations dans le même sens, 12 sans correspondance de variation.

La solubilité du bicarbonate de calcium diminue lorsque la température augmente. Les valeurs de la concentration en bicarbonates de l'eau du lac en fonction de la température sont représentées dans la figure 9 ci-contre. Pendant la période de la stagnation d'été et celle de la circulation partielle d'été, les points se trouvent presque tous situés sur une courbe dont la concavité, contrairement à celle de la courbe de FREAR et JOHNSTON, est tournée vers les petites teneurs en bicarbonates. Pendant la période de la circulation d'automne, l'eau de surface se refroidit rapidement au contact de l'air. Il ne peut pas se produire une augmentation de la concentration en bicarbonates qui corresponde à l'abaissement de la température, la diffusion des ions bicarbonates depuis les zones profondes du lac étant plus lente que le refroidissement de l'eau par l'air. On obtient donc pour cette époque des valeurs de dureté temporaire de l'eau, plus faibles que les valeurs normales.

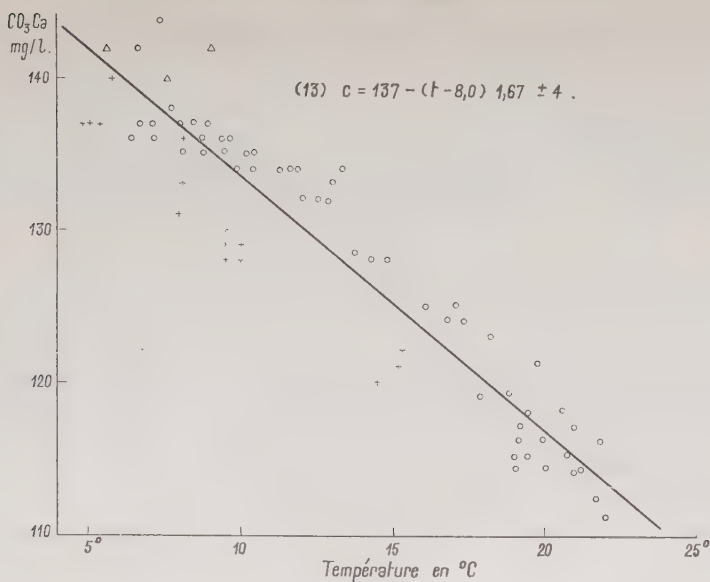


Figure 9

Variations de la dureté temporaire en fonction de la température de l'eau du lac de Neuchâtel

- = Pendant la stagnation d'été et la circulation partielle d'été.
 + = Pendant la circulation totale d'automne et pendant l'hiver.
 △ = Pendant la circulation totale d'automne. Prélèvement effectué à une profondeur où l'eau n'a pas encore été entraînée dans la circulation totale.

Malgré toutes ces fluctuations, on peut justifier la relation simple suivante:

$$c = 137 - (t - 8,0) 1,67 \pm 4. \quad (13)$$

c étant la dureté temporaire en mg $\text{CO}_3\text{Ca/l}$ et t la température de l'eau.

L'erreur quadratique moyenne sur une mesure, calculée avec 113 données d'analyse, est inférieure à 4. Par rapport aux variations de la dureté temporaire de 35 mg $\text{CO}_3\text{Ca/l}$, l'estimation au moyen de la formule (13) est entachée d'une erreur de 10%. Cette formule permettra cependant, grâce au grand nombre et à la qualité des mesures de A. QUARTIER, de se faire une meilleure idée des variations annuelles de la teneur en bicarbonates de l'eau du lac de Neuchâtel.

Pour le lac de Zurich, lac eutrophe, le phénomène de la décalcification de l'eau a été étudié par L. MINDER (1923, p. 24). D'après les données de ses analyses chimiques (effectuées pour les mois de janvier, mai, juillet, août, septembre, octobre, novembre, décembre), l'étude de la variation de

la dureté temporaire en fonction de la température, montre (figure 10 ci-dessous) qu'il existe pour ce lac une correspondance presque aussi bonne que pour le lac de Neuchâtel, entre la valeur de la dureté temporaire calculée et celle mesurée.

La valeur de la dureté temporaire peut être calculée à partir de l'équation suivante:

$$c = 119 - (t - 8,0) 1,67 \pm 5. \quad (14)$$

c étant la dureté temporaire en $\text{mg CO}_3\text{Ca/l}$ et t la température de l'eau du lac.

La valeur de la dureté temporaire de l'eau du lac de Zurich étant plus faible que celle du lac de Neuchâtel, il est normal que le terme constant soit plus faible dans l'équation (14) que dans l'équation (13). Il est intéressant de savoir que pour deux lacs si différents, le coefficient angulaire de l'équation est le même. *On déduit de ces conclusions que dans les deux lacs de Neuchâtel et de Zurich, les variations de la dureté temporaire avec la température sont les mêmes.*

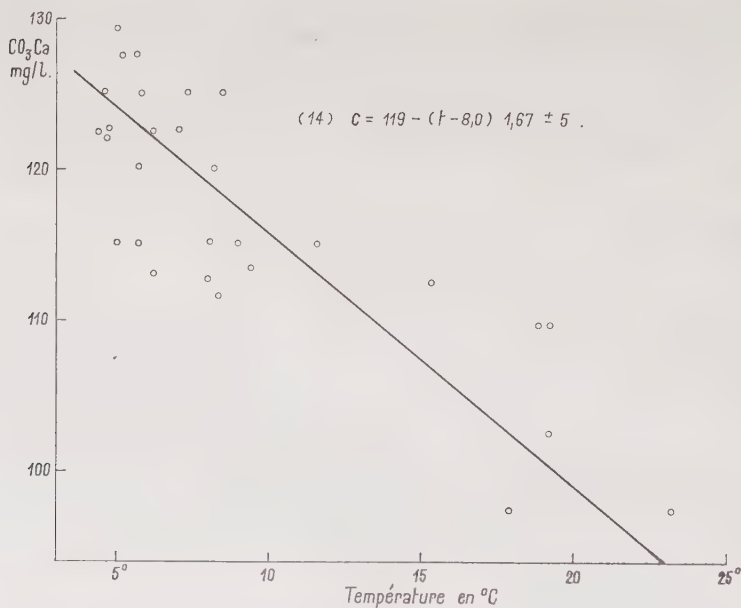


Figure 10

Variations de la dureté temporaire en fonction de la température de l'eau du lac de Zurich d'après les analyses de L. MINDER (1923, p. 20).

c) *Correspondance entre la température et la teneur en CO₂*

La correspondance entre les variations de la température et la teneur en CO₂ est moins nette que celle établie en fonction de la dureté temporaire. Ceci est partiellement dû au fait que les mesures de la teneur en CO₂, étant effectuées sur le lac, ne sont pas très précises.

Tableau 19

Variations de la température et de la teneur en CO₂ entre deux prélèvements

(a température; b teneur en CO₂; / = croissance; \ = décroissance; ○ = sans variation)

Date du prélèvement (1949-1950)		0 m		5 m		10 m		15 m		20 m		30 m		40 m		60 m	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
26 sept.	28 sept.	/	○	/	○	\	○	\	/	\	/	○	/	○	○	-	-
28 sept.	30 sept.	○	\	○	\	○	\	○	\	/	\	/	\	/	\	-	-
30 sept.	13 octobre	\	/	\	/	\	/	\	/	/	○	\	/	\	/	-	-
13 octobre	28 octobre	\	/	\	/	\	○	\	/	\	/	\	/	\	/	-	-
28 octobre	9 novembre	\	/	\	/	\	/	\	/	\	/	\	/	\	/	-	-
9 novembre	8 décembre	\	/	\	/	\	/	\	/	\	/	\	/	-	-	-	-
8 décembre	27 janvier	\	/	\	/	\	/	\	/	\	/	\	/	-	-	\	/
27 janvier	15 mars	\	\	\	\	\	○	\	○	\	○	\	/	-	-	-	-

54 cas, dont 1 sans variation. 28 variations en sens contraire, 12 variations dans le même sens, 13 sans correspondance de variation.

Le plus grand nombre des variations de la température avec la teneur en CO₂ se font en sens contraire, c'est-à-dire qu'à une augmentation de la température correspond une diminution de la teneur en CO₂ et inversement.

Dans un système en équilibre, la solubilité du CO₂ dans l'eau décroît pour une élévation de température suivant les valeurs:

Température.	0° C	10° C	20° C	30° C	40° C	50° C
CO ₂ dissous dans 100 g d'eau	0,335 g	0,232 g	0,169 g	0,126 g	0,097 g	0,076 g

La pression de vapeur du CO₂ est égale à une atmosphère.
L'étude des variations de la teneur en CO₂ de l'eau du lac avec la température montre qu'il n'y a pas de relation entre les valeurs obtenues pour un système en équilibre et celles mesurées pour l'eau du lac (figure II, p. 66). Dans le lac, pendant l'époque de la circulation partielle d'été, la teneur en CO₂ présente une valeur maximum pour une température de 11° C. Ceci est dû au fait que cette température de 11° C est celle de la

couche d'eau située à la limite inférieure de la couche de saut thermique, à l'endroit où il se produit généralement une accumulation du CO_2 . On peut expliquer cette accumulation de CO_2 , pendant l'été dans le voisinage de la couche de saut thermique, par les deux hypothèses suivantes:

- 1° L'échauffement de l'eau par absorption de l'énergie solaire chasse une partie du CO_2 par diffusion dans les couches profondes du lac, tout d'abord dans la zone située au-dessous de la couche de saut thermique où la température est plus basse.
- 2° Le brassage de l'eau dans le voisinage de la couche de saut thermique produit à lui seul une augmentation de la saturation en gaz carbonique. Si l'on considère deux quantités égales d'eau, de températures différentes t_1 et t_2 , ayant même degré de saturation s et que l'on mélange ces deux quantités d'eau, la température de l'eau du mélange sera $(t_1 + t_2)/2$ la suration en CO_2 aura la valeur $s + \Delta s$.

La combinaison de ces deux facteurs permet l'explication de l'existence d'une accumulation du CO_2 dans le voisinage de la couche de saut thermique.

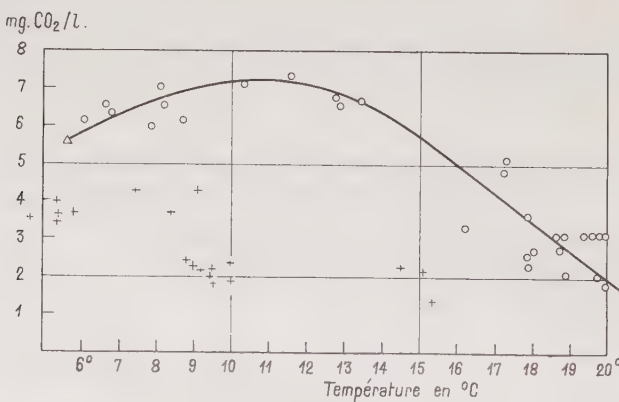


Figure 11

Relation entre la température et la teneur en gaz carbonique pour le lac de Neuchâtel

- = Echantillons prélevés pendant la circulation partielle d'été (mois de septembre et d'octobre 1949).
- + = Echantillons prélevés pendant la circulation complète d'automne (du 28 octobre 1949 au 8 décembre 1949).
- △ = Echantillon prélevé le 8 décembre 1949 à une profondeur de 110 m.

d) *Relation entre la teneur en CO_2 , la dureté temporaire et la concentration du carbonate en suspension*

Nous pensons qu'il doit exister dans le lac une relation entre la saturation de l'eau en CO_2 , la concentration en bicarbonates et celle en CO_3Ca en suspension. Ceci en considérant l'équation:



On conçoit facilement que l'action du CO_2 sur le carbonate en suspension produise une augmentation de la dureté temporaire due à une dissolution du carbonate. Un mécanisme si simple peut cependant, par lui-même, ne pas être suffisamment explicite. En effet, au point de vue quantitatif, la diminution de la concentration du CO_3Ca en suspension dans l'eau du lac, correspond-elle bien à l'augmentation de la dureté temporaire mesurée? Par comparaison des résultats d'analyses des prélèvements des 4 et 25 juillet 1949, on voit qu'à une diminution maximum du CO_3Ca en suspension de 0,5 mg/l, correspond une augmentation de la dureté temporaire de 4 mg CO_3Ca /l.

Profondeur	0 m	5 m	10 m
Diminution du CO_3Ca en suspension	0,1 mg CO_3Ca /l	0,25 mg CO_3Ca /l	0,5 mg CO_3Ca /l
Augmentation de la dureté temporaire	3 mg CO_3Ca /l	4 mg CO_3Ca /l	3 mg CO_3Ca /l

L'augmentation de la teneur en bicarbonate n'est donc due qu'en partie à la dissolution du CO_3Ca en suspension, la quantité de CO_3Ca en suspension qui a été dissoute ne représentant qu'environ le dixième de l'augmentation de la dureté temporaire. Elle provient du mélange de la couche d'eau considérée avec de l'eau plus riche en bicarbonates. Pratiquement, les variations de la concentration du CO_3Ca en suspension n'ont donc pas d'influence sur les variations de la dureté temporaire. Il est même fort probable qu'une partie appréciable de la diminution du CO_3Ca en suspension soit due à la chute des particules. Si la vitesse de chute est assez forte, la dissolution du CO_3Ca n'a pas le temps de se produire d'une façon appréciable.

L'étude des variations simultanées de la teneur en CO_2 , de celle du $(\text{CO}_3\text{H})_2\text{Ca}$ et de celle du CO_3Ca en suspension, montre (tableau 20) qu'il y a presque toujours coïncidence entre l'augmentation de la teneur du CO_2 et la diminution de la quantité de CO_3Ca en suspension (figure 8, page 61).

L'examen de ces quelques exemples montre qu'il existe une correspondance entre les variations de concentrations de CO_2 , de $(\text{CO}_3\text{H})_2\text{Ca}$ et de CO_3Ca en suspension. Cette correspondance n'est généralement pas très

exacte en ce sens que les zones de variations correspondantes ne se superposent pas exactement. Cependant, sans exceptions, *les régions auxquelles correspond une augmentation de la teneur en CO₂, sont des régions où la dureté temporaire augmente et la teneur en CO₃Ca en suspension diminue (et inversement).*

Tableau 20
Variation de la teneur en CO₂, en (CO₃H)₂Ca et en CO₃Ca en suspension
(✓ = augmentation; \ = diminution; ○ = sans variation)

Date (1949)	Teneur en CO ₂	Dureté temporaire	CO ₃ Ca en suspension
29 au 31 août. . .	—	✓ 33 à 15 m	\ 10 m (0,4 mg)
	—	○ 15 à 7 m	\ 15 m (0,6 mg)
	—	✓ 7 à 0 m	—
15 au 17 septembre	—	✓ 30 à 17 m	\ 10 m (0,4 mg)
	—	\ 10 à 17 m	\ 30 m (0,5 mg)
	—	✓ 10 à 0 m	—
26 au 28 septembre	✓ 30 à 10 m	✓ 30 à 3 m	✓ 0 m (0,5 mg)
	○ 10 à 0 m	\ 3 à 0 m	\ 5 m (0,05 mg)
	—	—	\ 15 m (0,10 mg)
28 au 30 septembre	—	—	\ 40 m (0,15 mg)
	\ 50 à 14 m	\ 45 à 23 m	✓ 50 à 14 m
	✓ 14 à 11 m	✓ 23 à 14 m	20 m (0,1 mg)
	\ 11 à 0 m	\ 14 à 4 m	\ 13 à 9 m
	—	✓ 4 à 0 m	✓ 9 à 0 m

En comparant les résultats des analyses de CO₂ et de CO₃Ca pour différentes profondeurs, il est possible de trouver une coïncidence entre la profondeur où la saturation en CO₂ est minimum et celle où la teneur en CO₃Ca en suspension est maximum.

Tableau 21
Profondeurs pour lesquelles la saturation en CO₂ est minimum et la concentration du CO₃Ca en suspension est maximum

Date (1949)	Profondeur à laquelle la saturation en CO ₂ est minimum	Profondeur à laquelle la concentration en CO ₃ Ca en suspension est maximum
26 septembre	15 m	15 m
28 septembre	16 m	0 m et 17 m
30 septembre	0 à 5 m	0 à 5 m
13 octobre	6 m	5 m
28 octobre	7 m	5 m
9 novembre	5 à 10 m	5 à 10 m
8 décembre	0 m	0 m

Ces données montrent nettement l'étroite correspondance (à 1 m près) entre la saturation minimum en CO_2 et la concentration maximum en CO_3Ca en suspension. Les facteurs autres que le CO_2 , en particulier la dureté temporaire, ne jouent aucun rôle dans la détermination de la zone de génération du CO_3Ca en suspension.

Les agents qui déterminent la précipitation du CO_3Ca pour une profondeur légèrement moins grande que celle de la couche de saut thermique, sont ceux qui fixent la position de la saturation minimum en CO_2 . Il est étonnant de constater que la saturation minimum en CO_2 ait lieu à une profondeur relativement assez éloignée de la surface.

Ce minimum de saturation du CO_2 est situé entre deux accumulations de CO_2 (pour ne pas dire qu'il résulte de ces accumulations de CO_2).

- 1° La première accumulation dont nous avons parlé à la page 66, se trouve à une profondeur légèrement plus grande que celle de la couche de saut thermique. A partir de cette zone la teneur en CO_2 décroît à la fois vers les couches profondes du lac et vers la surface.
- 2° La seconde accumulation de CO_2 se trouve en surface, ce qui paraît à première vue paradoxal, car cette concentration en CO_2 de l'eau de surface est supérieure à celle qui serait obtenue par le calcul en supposant que la répartition entre le CO_2 contenu dans l'air et celui contenu dans l'eau, suit la loi d'HENRY. Par le calcul, la concentration maximale en CO_2 dans l'eau serait de 1,3 mg/l. Or la concentration du CO_2 dans l'eau de surface du lac de Neuchâtel est comprise entre 1,8 et 3,5 mg/l.

Ce manque d'équilibre dans la répartition du CO_2 entre l'eau et l'air provient d'une continuelle accumulation du gaz dans l'eau, due en partie du moins à l'évaporation de l'eau.

La quantité d'eau évaporée par le lac de Neuchâtel a été déterminée par CH. KOPP (1859, p. 43). Des valeurs de même ordre de grandeur ont été obtenues par J. MAURER (1911, p. 554) pour le lac de Zurich et pour le Greifensee.

Si l'évaporation de l'eau produit une concentration des corps dissous dans le voisinage de la surface, les précipitations (pluies) produisent une dilution. D'après A. QUARTIER (1948, p. 105) la quantité d'eau évaporée annuellement est à peu près égale à celle reçue par le lac sous forme de précipitation, puisque le débit annuel moyen de l'évaporation est de 5,1 m³/s, tandis que celui des précipitations est de 6,0 m³/s. Si, au point de vue du bilan, les quantités d'eau évaporées sont égales à celles fournies par les précipitations, les actions de concentration et de dilution de l'eau

de surface sont alternées. On trouve encore là une nouvelle cause de la création d'un déséquilibre.

Le problème de l'évaporation de l'eau et des précipitations doit être considéré sous deux aspects différents, suivant que l'on considère son influence sur la teneur en CO_2 de l'eau ou celle en $(\text{CO}_3\text{H})_2\text{Ca}$. L'eau de pluie ne contient pas de bicarbonates, mais elle contient environ 1 mg de CO_2 par litre d'eau (L. TROOST et ED. PECHARD, 1929, p. 88), alors que l'eau du lac, pendant l'été et une bonne partie de l'automne, n'en contient en moyenne que 2 mg/l. Il en résulte que si l'eau de pluie occasionne une diminution de la teneur en CO_2 des eaux du lac, elle en apporte tout de même au lac une quantité importante. En comparant les dilutions produites par l'eau de pluie, on peut dire qu'elle occasionne une dilution deux fois plus grande de la teneur en bicarbonates que de celle en CO_2 . Pour bien mettre ce phénomène en évidence, le tableau 22 donne les valeurs relatives, sous forme de débits mensuels moyens, de l'influence de l'évaporation et des précipitations, sur la concentration en bicarbonates et en gaz carbonique de l'eau de surface.

Tableau 22

Valeurs relatives de l'influence de l'évaporation et des précipitations sur la concentration en $(\text{CO}_3\text{H})_2\text{Ca}$ et en CO_2 de l'eau de surface

Mois de	Débits mensuels moyens en m^3/s		Influence de l'évaporation en tenant compte des précipitations sur la concentration du:	
	Précipitation	Evaporation	$(\text{CO}_3\text{H})_2\text{Ca}$	CO_2
Janvier	0,39	0,16	— 0,23	— 0,04
Février	0,36	0,20	— 0,16	+ 0,02
Mars	0,42	0,25	— 0,17	+ 0,04
Avril	0,44	0,40	— 0,04	+ 0,18
Mai	0,51	0,57	+ 0,06	+ 0,31
Juin	0,62	0,73	+ 0,11	+ 0,31
Juillet	0,58	0,91	+ 0,33	+ 0,62
Août	0,60	0,80	+ 0,20	+ 0,50
Septembre	0,54	0,55	+ 0,01	+ 0,28
Octobre	0,57	0,26	— 0,31	— 0,03
Novembre	0,48	0,18	— 0,30	— 0,05
Décembre	0,48	0,10	— 0,38	— 0,14
Total	6,0	5,1		

Les valeurs positives indiquent un excédant de l'évaporation sur les précipitations, les valeurs négatives indiquent un excédent des précipitations sur l'évaporation.

Le tableau 22 et la figure 12 ci-dessous font ressortir la différence entre l'influence des précipitations et de l'évaporation sur la dureté temporaire et sur la teneur en gaz carbonique, ce qui explique du même coup que les courbes *dureté temporaire-profondeur* ne semblent pas être influencées par ces phénomènes comme les courbes *teneur en CO_2 -profondeur*.

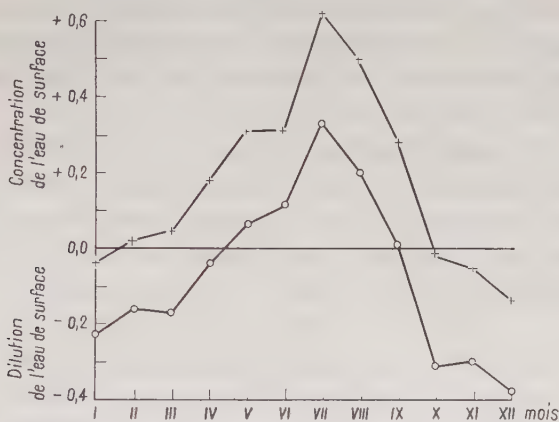


Figure 12

Valeurs relatives mensuelles de l'influence de l'évaporation et des précipitations, sur la concentration en $(\text{CO}_3\text{H})_2\text{Ca}$ et en CO_2 de l'eau de surface

+ = Concentration en CO_2 O = Concentration en $(\text{CO}_3\text{H})_2\text{Ca}$

La figure 12 montre encore nettement que du mois de février jusqu'au mois d'octobre, les précipitations et l'évaporation tendent à produire une accumulation de gaz carbonique en surface. L'hiver, les précipitations sont nettement plus importantes que l'évaporation, il se produit, alors, dans le voisinage de la surface une légère baisse de la teneur en CO_2 , et seul est visible le phénomène connu depuis longtemps de la diffusion du CO_2 depuis le fond du lac vers la surface où la concentration en CO_2 est minimum.

En conclusion, l'alternance entre les précipitations et l'évaporation produit respectivement une légère dilution ou une forte concentration de l'eau de surface. Au point de vue du bilan, ces phénomènes enrichissent l'eau de surface en gaz carbonique.

Tant que les facteurs qui produisent un déséquilibre dans l'eau du lac subsistent, il y aura toujours formation et destruction des deux zones d'accumulation du CO_2 citées ci-dessus. La formation de ces accumulations provoque dans la région située entre eux un manque en gaz carbonique qui détermine la précipitation du carbonate de calcium.

7. Conclusions sur le mécanisme de la précipitation du carbonate de calcium

Le lac est un domaine dans lequel l'eau transporte de grandes quantités de gaz carbonique, de bicarbonates, de matières organiques et autres matières en suspension. Ce domaine n'est pas sans relation avec le monde extérieur puisque le lac reçoit entre autre par les précipitations du gaz carbonique et par les affluents, du gaz carbonique, des bicarbonates, des carbonates et des matières organiques.

La quantité de bicarbonates dissous dans le lac de Neuchâtel estimée en CO_3Ca est d'environ $2 \cdot 10^6$ t (14 km^3 : $137 \text{ mg CO}_3\text{Ca/l}$). Le lac reçoit chaque année environ $300 \cdot 10^3$ t de CO_3Ca . La précipitation du carbonate de calcium atteint $90 \cdot 10^3$ t, c'est-à-dire environ un tiers à un quart de la quantité reçue annuellement et un dix-septième de celle contenue dans le lac.

La concentration des corps dissous dans l'eau du lac varie dans le courant de l'année. Les continuelles modifications des conditions physiques font du lac un système qui est loin d'être un système en équilibre.

En surface, il se produit tantôt une concentration des corps dissous due à l'évaporation de l'eau, tantôt une dilution due aux précipitations (pluies).

Pour une profondeur voisine de la couche de saut thermique, les facteurs qui influencent la température et la solubilité des corps dissous sont de deux ordres: Un facteur *absorption de l'énergie solaire* et un facteur *mélange de couches d'eau*, dû à l'action du vent. Ces deux facteurs s'opposent dans leur action, en ce sens que l'absorption de calories par l'eau tend à créer dans le lac des couches d'eau distinctes les unes des autres par la température et la concentration en sels dissous et que l'action du vent, en formant des courants lacustres, tend à produire un mélange de ces différentes couches d'eau. On assiste ainsi périodiquement à la prédominance de l'un ou de l'autre de ces deux facteurs, ce qui crée dans le lac de continuelles modifications de la composition chimique de l'eau. Il se produit pour des profondeurs déterminées des accumulations de gaz carbonique, qui vont déterminer dans une certaine mesure les valeurs de la dureté temporaire et qui vont fixer la région de précipitation maximum du CO_3Ca en suspension. Les modifications rapides des concentrations en corps dissous dans l'épilimnion ne sont pas produites par des réactions chimiques ou photochimiques, mais par le mélange de couches d'eau qui entraînent avec elles les corps dissous et le matériel en suspension. Les preuves de ces affirma-

tions sont fournies par le fait que les variations de la dureté temporaire ne correspondent pas quantitativement à celle de la teneur en carbonate de calcium en suspension et que celles de la teneur en CO_2 sont de beaucoup plus importantes que celles de la teneur en matière organique.

Contrairement à la théorie de la précipitation organique du carbonate de calcium, nous avons montré que les variations de la teneur en matière organique vont dans le même sens que celle de la teneur en gaz carbonique, ce qui prouve que c'est bien l'augmentation de la concentration du gaz carbonique qui, en favorisant l'assimilation par le phytoplancton, produit une augmentation de la teneur en matière organique.

Il existe encore une correspondance très précise entre la profondeur où la saturation en gaz carbonique est minimum et celle où la concentration en carbonate en suspension est maximum. Cette correspondance est si précise qu'il est possible de dire que la précipitation du carbonate de calcium dépend uniquement de la saturation en gaz carbonique.

Les petites particules de carbonate de calcium formées dans l'épilimnion tombent en chute libre vers le fond du lac. De par la forme de la courbe *carbonate de calcium en suspension-profondeur* il est possible de prouver une dissolution de CO_3Ca lors de la chute de ces particules vers le fond du lac. Cette dissolution est particulièrement intense pour la profondeur située légèrement au-dessous de la couche de saut thermique, pour laquelle la teneur en CO_2 est élevée.

Il a été possible, grâce au dosage direct du carbonate de calcium en suspension dans l'eau du lac, de préciser le mécanisme de la précipitation du carbonate de calcium, pour le lac de Neuchâtel. Il n'est pas impossible que par un mécanisme semblable, on puisse expliquer la précipitation du carbonate de calcium dans un lac eutrophe. L'analogie frappante de la variation de la dureté temporaire en fonction de la température pour le lac de Neuchâtel (oligotrophe) et pour le lac de Zurich (eutrophe) en est la meilleure preuve.

Troisième partie

SÉDIMENTS CALCAIRES

D'après la classification de M. STANGENBERG (1938, p. 400), un sédiment calcaire contient par définition plus de 50% de CO_3Ca . La craie lacustre est un sédiment calcaire dont la teneur en CO_3Ca est supérieure à 80% (E. WASMUND, 1930, p. 109).

Les sédiments du lac de Neuchâtel contiennent en moyenne 67% de CO_3Ca . En plus de ces sédiments, on trouve, à l'endroit appelé « La Motte », de la craie lacustre (voir page 8).

1. Formation des sédiments

Le plancton mort, les particules de CO_3Ca et le matériel silico-argileux contenus en suspension dans l'eau, tombent en chute libre au fond du lac. Dans ces conditions, la vitesse de chute dépend principalement de la densité des particules, de leur dimension, de leur forme et de la viscosité de l'eau.

Tableau 23

Vitesse de chute des particules dans de l'eau (densité des particules 2,65 [quartz]; température de l'eau 20° C)

(D'après H. GESSNER, 1936, p. 28)

Diamètre des particules	Vitesse de chute
0,02 mm	10 cm/50 s
0,006 mm	10 cm/7,5 min
0,002 mm	10 cm/1 h
0,0005 mm	10 cm/10 h

Ces valeurs sont valables pour de l'eau ne contenant que peu de matière en suspension, ce qui est le cas pour l'eau du lac. D'ailleurs, les variations de la densité et de la viscosité de l'eau contenant des matières en suspension sont les suivantes:

Tableau 24

Poids spécifique et viscosité de l'eau contenant des matières en suspension

(D'après F. HJULSTRÖM, 1935, p. 236)

Concentration de la suspension	Poids spécifique	Viscosité
9,5 mg/l	0,99854	0,0102
354,8 mg/l	0,99877	0,0104
848,1 mg/l	0,99909	0,0105
17620,0 mg/l	1,00044	0,0113
36679,3 mg/l	1,02524	0,0123

Les valeurs de la viscosité et surtout de la densité de l'eau augmentent lentement lorsque la concentration de matière en suspension croît. La concentration variant peu avec la profondeur, la vitesse des particules n'est pratiquement pas modifiée pendant la chute. Il est donc peu probable qu'il se produise à quelques mètres du fond du lac une forte augmentation de la concentration du matériel en suspension.

La vérification expérimentale est toujours délicate, le prélèvement de l'eau devant être précédé d'un sondage, qui peut modifier les conditions du lieu de prélèvement (analyse du 15 septembre 1949, devant le port de Neuchâtel, profondeur du lieu de prélèvement 42 m). La quantité de CO_3Ca en suspension dans le voisinage du fond du lac (0,5 m) est de 2 mg/l.

La présence de courants lacustres dans l'eau voisine du fond du lac peut modifier les conditions du dépôt des matières en suspension.

L'étude dynamique de la formation de dépôt, à partir de matières en suspension, a été faite par HJULSTRÖM (1935, p. 298). Le tableau 25 donne la grandeur maximum des particules maintenues en suspension pour une vitesse donnée du déplacement de l'eau.

Tableau 25

Diamètre maximum des particules maintenues en suspension pour une vitesse donnée de déplacement de l'eau

Diamètre des particules mm	Vitesse de déplacement de l'eau	
	cm/s	km/h
10	70	2,5
1	7,5	0,25
0,1	0,7	0,025
0,01	~ 0,07	0,0025

Les courants lacustres ne jouent pas un rôle important sur la formation des sédiments des régions profondes du lac, puisqu'il est possible de trouver dans ces derniers une quantité appréciable de petites particules d'un diamètre inférieur à 0,002 mm.

Les espaces compris entre les particules sont remplis par le l'eau. L'eau du lac contribue donc dans une large part à la formation du sédiment, puisque ce dernier en contient environ 60%. Pour le lac de Constance, HUMMEL (1923, p. 32) indique que les sédiments en formation contiennent 62% d'eau. A une certaine profondeur, les sédiments n'en contiennent plus que 54 à 55%.

La quantité d'eau soustraite annuellement au lac de Neuchâtel est de 200000 t (ce qui représente un débit annuel moyen de 0,006 m³/s, débit environ cent fois plus faible que celui du ruisseau de St-Blaise). Cette quantité représente le 1/1000 de la quantité d'eau évaporée annuellement et le 1/70000 de l'eau du lac.

Les sédiments semblent se tasser extrêmement lentement sous leur propre poids (J. BOUCART et CL. FRANCIS-BŒUF, 1942, p. 33). Le phénomène du tassement des sédiments du lac de Neuchâtel a été étudié tout d'abord par la mesure de la consistance.

La consistance est définie comme la fonction inverse de la pénétration d'un cône en métal dans un sédiment, après que le cône ait été placé, la pointe à la surface du sédiment. Le cône employé a un angle de 60° C et pèse 60 g (E. L. MERTZ, 1949, p. 45).

Tableau 26

Variation de la consistance des sédiments du lac de Neuchâtel

Profondeur cm	Sommet de la «Motte»	La «Motte»	Port d'Auvernier
6	1/21 mm ⁻¹	1/21 mm ⁻¹	1/11,9 mm ⁻¹
20	1/20,8 mm ⁻¹	1/21 mm ⁻¹	1/10,8 mm ⁻¹
40	1/18,0 mm ⁻¹	1/21,0 mm ⁻¹	—
60	1/16,3 mm ⁻¹	1/19,0 mm ⁻¹	—

La pénétration diminue avec la profondeur; donc la consistance augmente. Cette augmentation correspond à une diminution de la teneur en eau du sédiment.

Tableau 27

Teneur relative en eau selon la profondeur du sédiment

(Prélèvement sur une carotte de sondage)

Profondeur cm	Sommet de la «Motte»	La «Motte»	Auvernier grand fond	Port d'Auvernier
2	1,00	1,00	1,00	1,00
10	1,02	1,00	0,94	0,98
20	0,90	0,96	0,92	0,95
30	0,85	0,99	0,88	0,91
50	0,82	0,82	—	—
70	0,78	—	—	—
80	—	0,85	—	—

Par tassement, sous son propre poids et selon la verticale, le sédiment perd une certaine quantité de son eau. Il en résulte que les propriétés mécaniques des sédiments ne sont pas les mêmes dans toutes les directions. Ils sont considérés pour cette raison par TH. BRENNER (1931, p. 80) comme des corps anisotropes.

Les sédiments des régions profondes du lac ne subissent pratiquement pas d'érosion due au déplacement de l'eau, ce phénomène ne commençant que pour des vitesses de déplacement de l'eau supérieure à 20 cm/s (0,7 km/h) (HJULSTRÖM, 1935, p. 298).

2. Analyses des sédiments de la région semi-profonde (25 à 60 m) et profonde (60 à 150 m) du lac de Neuchâtel et particulièrement de la «Motte»

Les sédiments du lac de Neuchâtel sont formés d'un matériel homogène dans lequel il n'est pas possible de distinguer des couches annuelles. Les sédiments prélevés à une grande profondeur sont clairs dans une zone d'environ 10 cm depuis la surface. Ils sont gris-noir pour la zone plus profonde. Ce changement de couleur est dû à la formation de sulfure par les bactéries, la quantité d'oxygène contenue dans les sédiments n'étant pas assez importante pour les oxyder. La coloration grise disparaît rapidement au contact de l'air. Bien que le lac de Neuchâtel soit considéré comme un lac oligotrophe, il se produit tout de même, pour de grandes profondeurs, les premiers signes d'un manque en oxygène.

a) Analyses chimiques

D'après les analyses de F.-A. FOREL (cité par MONARD, 1919, p. 6), les sédiments du lac de Neuchâtel contiennent 68% de substances solubles dans l'HCl, et 29% de silicates. Des analyses plus détaillées ont été faites par ZENDER (1908, p. 37) et par RISLER et WALTER (1877, p. 122).

Tableau 28
Analyse des sédiments du lac de Neuchâtel

	ZENDER	RISLER et WALTER
Fe ₂ O ₃	7,54	2,11
Al ₂ O ₃	2,18	0,68
SiO ₂	20,03	—
SiO ₂ + silicates	—	29,17
Matière organique + eau liée	3,05	3,17
Somme	32,80	35,13
CO ₂	30,58	29,46
CaO	35,50	34,28
MgO	1,12	1,13
Somme	67,20	64,87

Les sédiments des régions profonde et semi-profonde du lac de Neuchâtel ont une composition chimique à peu près constante, quel que soit le lieu de prélèvement (carte figure 13).

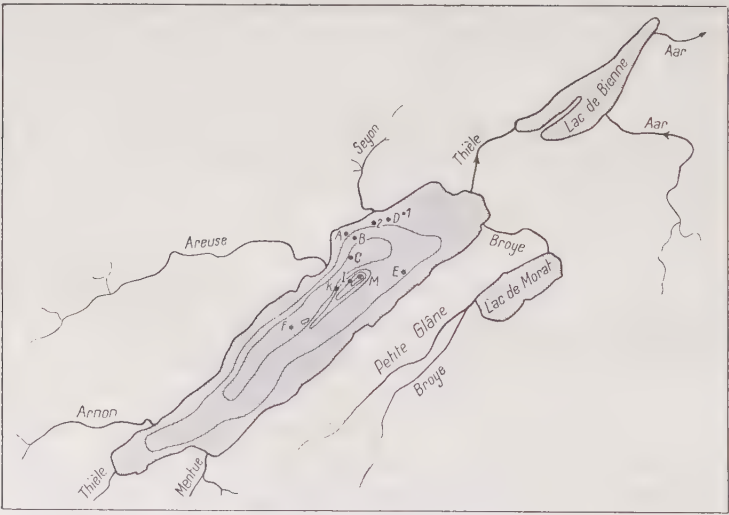


Figure 13
Lac de Neuchâtel et la région environnante avec les endroits de prélèvements

Les sédiments de la « Motte » bien qu'étant des sédiments formés à une faible profondeur (9 à 20 m) ne peuvent être assimilés à des sédiments de la zone littorale. Contrairement aux affirmations de MONARD (1919, p. 131), ils ne sont pas formés d'un « sable molassique grossier », mais de craie lacustre (voir tableaux 29 et 30).

Les analyses du tableau 29 démontrent entre autre une certaine homogénéité des sédiments des régions profondes du lac de Neuchâtel.

Tableau 29

Analyses des sédiments du lac de Neuchâtel prélevés à différents endroits

(voir carte figure 13)

	Flanc sud-ouest de la « Motte »		Devant Auvernier 30 m de profondeur.	Devant Auvernier 65 m de profondeur	Neuchâtel 600 m dev. la table d'orientation	2 km devant la station de pompage	2 km à l'est de la « Motte »	2 km devant Chez-le-Bart	400 m au sud de l'em- bouchure de l'Areuse	Sommet de la « Motte »
	K	I	A	B	D	3'	E	F	G	H
CO ₃ Ca + CO ₃ Mg (comptés en CO ₃ Ca)	86,3	90,9	64,0	63,9	—	71,6	70,8	69,4	63,9	91,6
Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (soluble dans HCl dilué) . . .	—	—	—	0,9	—	2,0	1,6	1,5	2,2	—
Résidu insoluble dans HCl dilué.	11,7	9,5	28,7	28,2	—	22,0	23,4	24,4	30,6	8,2
Phosphates (comptés en P).	—	—	—	0,034	0,034	—	0,036	0,038	0,036	0,004
Carbone contenu dans la matière organique . . .	—	—	—	—	—	0,53	—	0,58	—	—
Matière organique	0,8	0,5	1,0	0,9	—	1,1	1,5	1,2	1,6	—
Somme carbonates oxydes et matiè- res organiques .	—	—	—	93,0	—	95,6	95,8	95,3	96,7	—
Eau liée	—	—	—	7,0	—	4,4	4,2	4,7	3,3	—
Densités	1,38	—	—	—	—	1,30	1,25	1,27	1,31	1,24

Par l'étude au microscope de la matière organique contenue dans les sédiments, il a été possible de mettre en évidence la présence d'une quantité importante de cellulose (MOLISCH, 1913, p. 16), de traces de lignine (réactif à la phloroglucine) et de gros grains de pollen de conifères.

Il existe une correspondance entre la valeur de la teneur en matériel silico-argileux et celle de la teneur en eau liée d'un échantillon. Pour une

répartition granulométrique semblable, l'échantillon le plus riche en matériel silico-argileux est aussi le plus riche en eau liée.

b) Analyses granulométriques

L'analyse chimique a permis de déceler une certaine homogénéité de composition des sédiments des régions profondes et semi-profondes du lac. L'analyse granulométrique montre que les particules dont le diamètre est compris entre 0,02 et 0,002 mm forment à elles seules plus des 63% du poids de ces sédiments (échantillons B, E, 3', F).

Tableau 30
Analyse granulométrique des sédiments du lac de Neuchâtel
(Carte des stations, page 78)

Fraction	Flanc sud ouest de la «Motte»	Sommet de la «Motte»	Devant Auvrier 65 m de profondeur	2 km à l'est de la «Motte»	2 km devant Champ-Bougin	2 km devant Chez-le-Bart	400 m ausud de l'embouchure de l'Areuse
	I	H	B	E	3'	F	G
1	54,7	90,9	8,4	12,5	10,8	2,8	34,3
2	20,7	4,7	40,5	23,8	31,8	30,0	38,5
3	13,7	2,5	25,0	39,9	42,1	47,1	21,0
4	10,9	1,9	26,1	23,8	15,3	20,1	6,2

Fraction 1: 0,5 à 0,02 mm Fraction: 2 0,02 à 0,006 mm
Fraction 3: 0,006 à 0,002 mm Fraction: 4 0,002 à 0,0005 mm

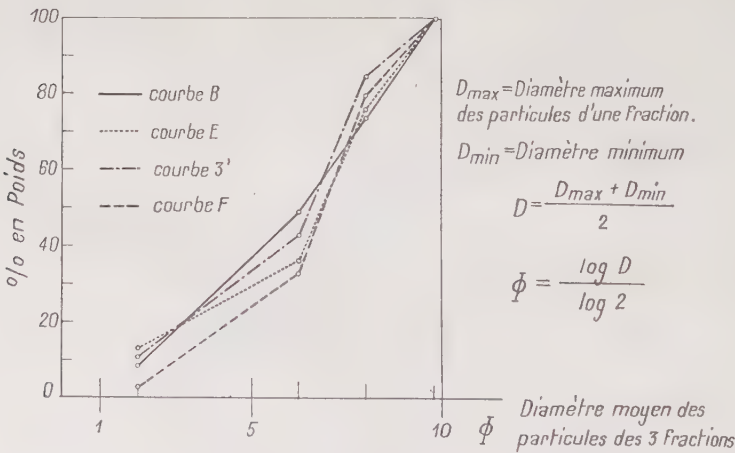


Figure 14
Courbes cumulatives (Analyses granulométriques)

La teneur en CO_3Ca dans les différentes fractions de l'échantillon prélevé devant Auvernier est relativement constante, la teneur en CO_3Ca pour l'échantillon prélevé sur la « Motte » diminue lorsque la grandeur des particules diminue.

Tableau 31

Dosage des carbonates dans différentes fractions de deux échantillons

Fraction	Pour-cent de carbonates dans les fractions	
	Sud-ouest de la « Motte » (I)	Auvernier, 65 m de profondeur (B)
1	91	65
2	87	60
3	80	65
4	76	65
Pour-cent de carbonates dans l'échantillon primitif	86,3	63,9

La comparaison de la répartition du CO_3Ca dans les différentes fractions permet de se rendre compte que la précipitation du CO_3Ca sur la « Motte » est due à une augmentation du nombre des germes de cristallisation et surtout à une forte croissance des grains. Il en résulte que les fractions les plus grossières contiennent le plus fort pourcentage de CO_3Ca .

3. Phosphore dans les sédiments

Le phosphore est un des constituants importants de l'eau du lac, au point de vue de sa teneur en matière organique. La présence d'une grande quantité de phosphore permet un accroissement toujours plus important de la matière organique. L'eau cesse alors d'être potable.

Le lac reçoit constamment par les égouts et par les affluents une quantité appréciable de phosphore. En supposant à 50000 le nombre d'habitants qui alimentent les égouts se jetant dans le lac, et sachant que chaque personne élimine par jour environ 1 g de phosphore, l'apport en phosphore sera annuellement de 18 t. On peut se demander comment le lac va éliminer ce phosphore.

Des mesures de laboratoire de F. GESSNER (1939) ont montré que par action d'une suspension de CO_3Ca sur une solution de KH_2PO_4 (0,1 mg P/l), il se produit une précipitation de $(\text{PO}_4)_2\text{Ca}_3$.

Pour précipiter 1 g de phosphore, on emploie 2000 à 3000 g de CO_3Ca . Il est trop hardi de déduire de ces expériences que dans un lac, le phosphore est précipité par le CO_3Ca en suspension. Il est cependant intéressant de remarquer dans les sédiments du lac de Neuchâtel, que la teneur en phosphates et en carbonates est relativement constante et que le rapport

$$\frac{\text{Pour-cent } \text{CO}_3\text{Ca}}{\text{Pour-cent P}} = \frac{70}{0,035} = 2000 \quad (16)$$

est du même ordre de grandeur que celui trouvé expérimentalement. Pour les sédiments de la « Motte », la valeur du rapport est encore plus élevée, elle est de 20000. Les rapports $\text{CO}_3\text{Ca}/\text{P}$ sont calculés, pour différents lacs, dans le tableau 32.

Tableau 32

Rapport entre le poids de CO_3Ca et celui de P contenus dans 100 g de sédiment

	CO_3Ca	Phosphore	$\frac{\text{Carbonate}}{\text{Phosphore}}$
Lac de Neuchâtel	70	0,035	2000
Lac de Neuchâtel («La Motte») . .	92	0,004	20000
Lac Léman			
(profondeur du sédiment 0,8 m) .	50 ¹⁾	0,007 ²⁾	7000
Lac Léman			
(profondeur du sédiment 3,4 m) .	51 ¹⁾	0,010 ²⁾	5000
Lac Kaczan ³⁾	67	0,08	800
Lac Remiankiniek ³⁾	65	0,10	700
Lac Wigry ³⁾	59	0,11	500

¹⁾ E. JOUKOWSKY et J.-PH. BUFFLE (1938, p. 451)
²⁾ J.-PH. BUFFLE (1939, p. 72)
³⁾ M. STANGENBERG (1938, p. 403)

La valeur du rapport $\text{CO}_3\text{Ca}/\text{P}$ varie dans de larges proportions. Pour les lacs peu profonds de Pologne, le rapport est compris entre 500 et 1000; il devient encore plus petit pour des étangs, où il atteint la valeur 14 (M. STANGENBERG, 1943, p. 26).

Le poids de phosphore qui est soustrait annuellement au lac de Neuchâtel par les sédiments est de 45 t. Les sédiments éliminent donc une quantité de phosphore supérieure à celle apportée au lac par les égouts.

Il est intéressant de remarquer que les poissons enlèvent à l'eau du lac une quantité de phosphore non négligeable. En ne considérant que le poisson qui a été pêché, environ 300 t par an, et en supposant que la matière inorganique (2%) est du $(\text{PO}_4)_2\text{Ca}_3$ pur, la quantité de phosphore soustraite annuellement au lac est de 1,2 t.

4. Craie lacustre de Cerlier

Près de Cerlier, le long du chemin qui mène à l'île de St-Pierre, le sol est formé d'un sédiment fortement calcaire qui est de la craie lacustre. Cette craie est située à 1 à 2 m au-dessus du niveau moyen actuel du lac de Bienne. Elle a été formée lorsque l'Aar ne se jetait pas encore dans le lac de Bienne (percement du canal de Aarberg-Hagneck en 1878). Elle représente actuellement un sédiment en voie de dessèchement et contient 50% plus d'eau que le sédiment séché à 110° C, alors qu'un sédiment récemment formé en contient entre 100 et 150%.

L'échantillon de craie de Cerlier a une composition chimique très voisine de celle de la « Motte ».

Tableau 33

Analyses de la craie lacustre de Cerlier et de la « Motte »

(Indications en pour-cent)

	Craie de Cerlier	Craie de Cerlier	Craie de la « Motte »		
	profondeur 30 cm	profondeur 1 m	H	I	K
$\text{CO}_3\text{Ca} + \text{CO}_3\text{Mg}$ (compté en CO_3Ca) .	86,4	80,4	91,6	90,9	86,3
Résidu insoluble dans HCl dilué	11,7	16,1	8,2	9,5	11,7
Phosphates (comptés en P) . .	0,006	0,008	0,004	—	—
Matière organique . .	0,9	0,6	—	0,5	0,8
Eau liée	1,7	3,8	—	—	2,0

L'analogie entre l'échantillon de craie de Cerlier (30 cm) et celui de craie de la « Motte » (K), est frappante.

La répartition du CO_3Ca dans les différentes fractions granulométriques est la même pour la craie de Cerlier que pour celle de la « Motte ».

Tableau 34

Quantités de carbonates de calcium dans les différentes fractions granulométriques de la craie lacustre de Cerlier et de celle de la « Motte »

Fraction	Craie de Cerlier prélevée à 30 cm de profondeur	Craie de la « Motte » (I)
1	91% CO_3Ca	91% CO_3Ca
2	86% CO_3Ca	87% CO_3Ca
3	79% CO_3Ca	80% CO_3Ca
4	75% CO_3Ca	76% CO_3Ca

Fraction 1: 0,5 à 0,02 mm

Fraction 3: 0,006 à 0,002 mm

Fraction 2: 0,02 à 0,006 mm

Fraction 4: 0,002 à 0,0005 mm

La similitude des pourcentages de CO_3Ca dans les différentes fractions granulométriques est nette. Il doit exister entre les deux craies, du lac de Neuchâtel et du lac de Bienne, une analogie non seulement de composition mais aussi de formation.

En effet, avant la correction des eaux du Jura, la craie de Cerlier était située à quelques mètres au-dessous du niveau du lac, dans des conditions voisines de celles qui existent actuellement pour la « Motte ».

L'arrêt de la formation de la craie lacustre de Cerlier correspond donc au début de la formation de la craie de la « Motte ».

La formation de craie lacustre dans les lacs de Neuchâtel et de Bienne est donc liée uniquement à des conditions géographiques. Il y aura formation de craie, s'il existe dans un lac un endroit séparé de la région littorale et situé à quelques mètres au-dessous du niveau du lac.

5. Généralités sur la formation des sédiments lacustres

L'épaisseur du dépôt annuel d'un sédiment varie avec le temps. Il serait commode de pouvoir trouver dans ce sédiment un corps étalon, c'est-à-dire un corps dont le poids déposé chaque année soit constant. La détermination de la concentration de ce corps dans le sédiment, à différentes profondeurs, permettrait de calculer le rapport entre les poids annuels de sédiment formé aux époques correspondantes à ces profondeurs. Il serait possible, grâce à ces données, de se rendre compte des variations des épaisseurs des couches annuelles pour différentes époques.

Théoriquement, le problème est très simple. Nombreux sont les auteurs qui, qualitativement, ont mis en relation la variation de la concentration d'un corps dans un sédiment, avec l'épaisseur du dépôt annuel. M. WELTEN (1944, p. 125), grâce à la mesure de l'épaisseur des dépôts annuels au moyen de l'analyse pollinique, a montré que dans le Faulenseemoos près de Spiez, cette épaisseur dépend principalement de la quantité de CO_2Ca qui est précipitée, l'argile n'ayant que le rôle d'un accompagnant. L'argile pourrait jouer dans ce cas le rôle du corps étalon. Le calcul ne confirme malheureusement pas cette manière de voir; les épaisseurs des dépôts annuels que nous avons calculées ne correspondent pas à celles obtenues par M. WELTEN au moyen de l'analyse pollinique.

Pratiquement, les modifications de la précipitation d'un corps influencent toujours dans une certaine mesure la précipitation des autres corps. L'idée d'un poids étalon d'une substance déposée régulièrement chaque année dans les sédiments n'est guère valable si l'on considère le temps de quelques milliers d'années. Car si les limnologues ont été frappés de la constance de la concentration en sels dissous dans l'eau d'un lac pour une durée de 50 ans, cette constance n'existe pas à l'échelle du millier d'années.

Cette dernière remarque permet de situer exactement le problème. Il faut renoncer à trouver dans les sédiments un corps dont la précipitation est régulière et égale pendant des milliers d'années. Par contre, il est possible, pour une période relativement courte, de supposer que, malgré des modifications des conditions physiques, le poids de certains corps n'ait que peu varié.

Cette hypothèse a été faite dans la première partie de ce travail (page 14) lors de la détermination de l'épaisseur du dépôt annuel des sédiments de la « Motte ». Le changement du mode de précipitation n'est, dans ce cas, pas dû à une modification de la température mais à une variation du niveau du lac. Comme il s'est agit d'une variation très rapide (quelques années) et que la couche d'eau située au-dessus du sédiment n'a pas diminué de plus de 25%, on est en droit d'admettre en première approximation, une constance dans le poids de matériel silico-argileux déposé dans les sédiments, avant et après la transformation.

On peut se demander d'autre part si, pour une époque donnée, il est possible de trouver un constituant des sédiments qui se dépose d'une manière homogène sur toute la surface du fond du lac.

Pour le lac de Constance, HUMMEL (cité par J. ROMIEUX, 1930, p. 215) a déjà énoncé le principe d'une répartition homogène du carbonate de calcium puisqu'il écrit: « Le carbonate de calcium résulte de la libération par

les algues en été, de particules calcaires. La quantité de calcite ainsi libérée devrait être à peu près du même ordre dans toutes les parties du lac par unité de temps et de surface.»

Pour le lac de Neuchâtel, il a été montré que la précipitation du carbonate de calcium se fait d'une manière homogène, au moins pour les échantillons que nous avons prélevés dans les régions semi-profondes et profondes du lac. La précipitation du matériel silico-argileux semble aussi homogène. En effet, alors que le matériel roulé, apporté au lac par les affluents, se dépose à proximité des embouchures, les particules les plus fines sont entraînées avec l'eau de la rivière dans le lac. La température moyenne de l'eau des affluents n'est pas inférieure à la température moyenne de l'eau de l'épilimnion (A. QUARTIER, 1947, p. 57); les matières en suspension sont donc réparties dans la couche supérieure du lac, lors du mélange de l'eau des affluents avec celle du lac. On pourrait supposer qu'elles se déposent ensuite d'une manière homogène sur toute la surface du fond du lac. Il serait alors naturel que les sédiments des zones semi-profondes et profondes aient relativement la même composition chimique.

Il semble que l'on pourrait s'inspirer de telles idées, lors de l'étude des sédiments du lac Léman, en particulier pour la région orientale de ce lac. Comme l'a montré E. UETRECHT (1906), le Rhône charrie de grandes quantités de matières en suspension (en moyenne au mois de juillet 690 mg/l) formées de matériel micacé. En supposant une précipitation homogène du CO_3Ca sur toute l'étendue du lac, la comparaison de la teneur en CO_3Ca dans les sédiments devrait permettre l'estimation de l'épaisseur des dépôts annuels. Malheureusement, il n'existe aucune correspondance entre la teneur en carbonates déterminée par J. ROMIEUX (1930, p. 253) et l'épaisseur des dépôts annuels mesurée par ED. PAREJAS (1929, p. 209). L'influence du Rhône sur la formation des sédiments ne consiste pas seulement en un apport de matériel silico-argileux; elle apporte au sédiment du carbonate de calcium en suspension et modifie certainement les conditions de précipitation du carbonate de calcium.

Pour expliquer que les sédiments de la région profonde du lac de Constance ont une teneur en CO_3Ca plus faible que les sédiments des régions peu profondes, HUMMEL (1923) émet l'hypothèse que les cristaux de calcite formés dans l'épilimnion subissent une dissolution lors de leur chute. D'après les données de l'expédition «Challenger», L. CAYEUX (1916) montre que les particules calcaires astreintes à franchir de grandes épaisseurs d'eau pour gagner le fond de la mer, subissent une dissolution d'autant plus grande que la profondeur est plus grande. 80% des coquilles de

la surface atteignent des fonds de 900 m, 50% atteignent 3000 m où elles sont partiellement dissoutes.

Il résulte de ces quelques constatations que les lacs pour lesquels la précipitation du carbonate de calcium est rigoureusement homogène ne peuvent pas être nombreux. L'apport par les affluents d'un abondant matériel en suspension, la redissolution des particules de carbonate de calcium lors de la chute vers le fond du lac, sont autant de facteurs qui s'y opposent.

La formation des sédiments de la région littorale est plus complexe que celle des sédiments appartenant à la région pélagiale. Elle est compliquée par la présence d'un matériel résultant de l'érosion des rives. Les facteurs qui influent la formation de ces sédiments sont les suivants:

- 1° Erosion des rives;
- 2° dépôt des matières contenues en suspension dans l'eau du lac;
- 3° précipitation accentuée de carbonate de calcium due à la faible profondeur à laquelle se trouve le sédiment.

La nature des rives influe directement la composition chimique de ces sédiments. Par exemple, les sédiments de la rive nord du lac de Neuchâtel sont plus calcaires que ceux de la rive sud. On peut préciser l'action de l'érosion par l'étude de la granulométrie du sédiment. Les fractions les plus grossières des sédiments de la rive nord du lac de Neuchâtel contiennent une importante partie du matériel formé par érosion (forte teneur en CO_3Ca). L'action des vagues maintient le matériel fin en suspension; il se dépose dans des régions légèrement plus profondes. Pour de petites profondeurs, la précipitation du CO_3Ca et du matériel silico-argileux augmente jusqu'à des profondeurs de 6 à 9 m. Il doit alors se produire des particules de calcaire relativement grosses, analogues à celles formées sur la « Motte ». La précipitation du carbonate devient ensuite moins intense lorsque la profondeur augmente. Pour ces profondeurs, le matériel silico-argileux qui se dépose diminue lorsque la profondeur croît; en effet, l'augmentation de l'intensité des courants lacustres avec l'éloignement du rivage mesurée pour le lac Léman par A. BETANT et G. PERRENOUD (1932, p. 267) vérifient ces affirmations.

La combinaison de ces différents facteurs permet l'explication des valeurs des épaisseurs des sédiments crayeux prélevés dans le lac Léman par J. FAVRE (1935, p. 301).

Epaisseur d'eau .	3,5 m	6,35 m	10,45 m	19,5 m	24,5 m	32 m
Epaisseur des sédiments crayeux .	13 m	16 m	15,5 m	11 m	10,8 m	7,4 m

En terminant ce travail je veux exprimer ici ma reconnaissance à MM. les Professeurs E. WEGMANN et CH.-G. BOISSONNAS qui m'ont dirigé dans mes recherches et aidé par leurs conseils ainsi qu'à M. le Professeur H. LAGOTALA pour ses suggestions lors de la rédaction.

SUMMARY

The present paper studies the calcareous sediments of lake Neuchâtel. The thickness of the annual deposit of mud has been estimated by various methods (pp. 10 to 28). Precipitation of CO_3Ca is tentatively related to variation of the depth at which is found the so-called «Sprungschicht» (pp. 29 to 73). Some of the physical and chemical properties of calcareous sediments have been determined (pp. 74 to 87).

BIBLIOGRAPHIE

- Carte géotechnique de la Suisse*. Echelle 1:100000. NIGGLI, P., et DE QUERVAIN, F., Carte publiée par la Commission géotechnique de la Société helvétique des Sciences naturelles (Kummerly & Frey, Berne 1934, 1935, 1936, 1938).
- Carte pluviométrique de la Suisse*. Echelle 1:500000. Moyennes annuelles des précipitations de la période 1901-1940. Carte calculée et dessinée par H. UTTINGER. Association Suisse pour l'Aménagement des Eaux (Zurich 1948).
- ABEGG, R., *Handbuch der anorganischen Chemie*, vol. 3, 2 (S. Hirzel, Leipzig 1909), 921 pages, 64 figures.
- ALLGESER, R. J., PETERSON, W. H., et JUDAI, C., *Availability of Charbon in certain aquatic materials under aerobic conditions of fermentation*, Rev. Ges. Hydrobiol. Hydrogr. 30, 371-378 (1934).
- AMBERG, O., *Limnologische Untersuchungen des Vierwaldstättersees*, Mitt. naturf. Ges. Luzern (Phys. Teil) 1904, 1-142.
- ARRHENIUS, G., *Den Glaciala Lerans Varvighet*, Sver. Geol. Unders. (C) n° 486, 1-74 (Stockholm 1947).
- AUERBACH, M., *Studien über die Zooplanktonverteilung im Bodensee im Verlauf von 24 Stunden*, Rev. Hydrol. 6, 1-30 (1934).
- BACHMANN, H., *Hydrobiologische Untersuchungen am Rotsee*, Rev. Hydrol. 5, 39-81 (1931).
- BAIER, C. R., *Die Bedeutung der Bakterien für den Kalktransport in den Gewässern*. Geologie der Meere und Binnengewässer 1, 75-105 (1937).
- BALAVOINE, P., *Variation sur la composition de l'eau du lac de Genève*, C. r. Soc. Phys. 56, 36-38 (1939).

- BÉTANT, A., et PERRENOUD, G., *Etude sur la partie occidentale du lac de Genève. Courants et températures*, Mém. Soc. Phys. Hist. nat. Genève 41, fasc. 2, 225-293 (1932).
- BOUCART, J., et FRANCIS-BŒUF, CL., *La vase* (Hermann, Paris 1942), n° 927, 67 pages.
- BRJAIKOV, B., FRANCIS-BŒUF, CL., et ROMANOVSKY, V., *Techniques d'étude des sédiments* (Hermann, Paris 1943), 110 pages.
- BRAND, A., *Über den Zelluloseabbau in Seen*, Arch. Hydrobiol. 40, 778-821 (1944) (cité par E. A. THOMAS, 1946, p. 157).
- BRENNER, TH., *Mineraljord. fysikal. Egenskaper*, Bull. Comm. géol. Finlande, n° 94 (1931), 124 pages.
- BUFFLE, J.-PH., *Séparation et détermination quantitative des matières organiques en suspension dans l'eau*, Soc. Phys. Hist. nat. Genève 57, 277-280 (1940).
- BUCH, K., *Kolsyrejämbikten i Baliska Havet*, Fennia (Helsingfors) 68, n° 6 (1945), 208 pages.
- BUCH, K., et GRIPENBERG, ST., *Über den Einfluß des Wasserdruckes auf pH und Kohlensäuregleichgewicht in größeren Meerestiefen*, J. Conseil int. Expl. Mer 7 (1932) (cité par H. WATTENBERG, 1937).
- CAYEUX, L., *Introduction à l'étude pétrographique des roches sédimentaires*, Mém. Carte géol. France (Imprimerie nationale, Paris 1916).
- CASPARI, W. A., *The deposits of the Scottish fresh-water lochs. Bathy metrical Survey of the Scottish fresh-water lochs*, Rep. sci. Results 1, 261-274 (Edinburgh 1910) (cité par B. BRAJNIKOV, C. FRANCIS-BŒUF, V. ROMANOVSKY, 1943, p. 37).
- CHARLOT, G., et BÉZIER, D., *Méthodes modernes d'analyse quantitative minérale* (Masson, Paris 1945), 525 pages.
- CLARKE, FR. W., *The composition of the river and lake waters of the United States* (Government Printing Office, Washington 1924).
- COLLET, L. W., *Les lacs* (Ed. G. Doin, Paris 1925), 63 figures, 28 planches hors texte.
- CONNE, F., *La valeur de l'eau du lac de Neuchâtel pour l'alimentation*, Soc. neuchâteloise Sci. nat. 32, 215-220 (1904).
- CORRENS, C. W., *Anzeichen von Beziehungen zwischen Strömungen und Bildung küstenferner Sedimente*, N. Jb. Mineral. [B B] 57, 1109-1118 (1927).
- DAMAS, H., *La stratification thermique et chimique des lacs Kivu, Edouard et Ndalaga (Congo belge)*, Verh. int. Ver. theor. angew. Limnol. 8, 51-68 (1937).
- ECKEL, O., *Über die mechanischen Arbeitsgrößen der Binnenseen*, Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol. [A], Meteorol. Geophys. (1948).
- EHRKE, G., *Die Assimilation in ihrer Abhängigkeit vom Licht, von der Temperatur, der Kohlensäuremenge und der Zeit*, Rev. Hydrobiol. 31, 373-420 (1934).
- ERIKSSON, J. V., *La dénudation chimique en Suède*, 3^e Conférence hydrologique des Etats baltes (Varsovie, mai 1930).
- FAVRE, J., *Etude sur la partie occidentale du lac de Genève, II: Histoire macologique du lac de Genève*, Mém. Soc. Phys. Hist. nat. 41, 295-414 (1935).
- FINCH, G. I., et WHITEMORE, E. J., *Crystal growth on calcite surfaces*, Trans. Faraday Soc. 34 (I), 640-645 (1938).
- FOREL, F.-A., *Le Léman* (Ed. Rouge, Lausanne), vol. I (1892): 539 pages; vol. II (1895): 651 pages; vol. III (1904): 715 pages.
- FRANCIS-BŒUF, CL., *Le rapport de l'azote à la matière organique totale dans les vases de l'estuaire de la Pensé (Finistère)*, C. r. somm. Soc. Géol. France (1941).

- FUHRMANN, O., *Le plancton du lac de Neuchâtel*, Bull. Soc. neuchâteloise Sci. nat. 28, 86-99 (1900).
- GARRISON, A. D., et TEN BRINK, K. C., *Untersuchung über die verschiedenen Gesichtspunkte bei der chemischen Kontrolle von Aufschlammungen von Kreiden*, Chem. Cbl. 1, 2751 (1940).
- DE GEER, G., *A chronology of the last 12,000 years*, C. r. 2^e Session Congr. géol. int. p. 241-253 (Stockholm 1910).
- GESSNER, F., *Die Phosphorarmut der Gewässer und ihre Beziehungen zum Kalkgehalt*, Int. Rev. Ges. Hydrobiol. Hydrogr. 38, 203-211 (1939) (cité par E. A. THOMAS, 1946, p. 157).
- GESSNER, H., *L'analyse mécanique. Tamisage, Sédimentation, Lévigation* (Ed. Dunod, Paris 1936), 270 pages.
- GIEYSZTOV, M., *Limnologische Untersuchungen an einigen Kleingewässern*, Arch. Hydrobiol. 8, 75-148 (1934).
- GRIPENBERG, ST., *A study sediments of the North Baltic and Adjoining Seas*, Fennia 60 (3), 1-231 (1934).
- GÜBELI-LITSCHER, O., *Chemische Untersuchung von Mineralwässern* (Wagner, Innsbruck 1948), 215 pages.
- GUYOT, ED., *Observations météorologiques faites en 1949 à l'Observatoire cantonal de Neuchâtel*, Bull. Soc. neuchâteloise Sci. nat. 73, 121-141 (1950).
- GUYOT, ED., et PERRENOUD, J., *Le vent à Neuchâtel de 1943 à 1947*, Bull. Soc. neuchâteloise Sci. nat. 72, 11-142 (1949).
- HALBFASS, W., *Grundzüge einer vergleichenden Seekunde* (Bornträger, Berlin 1923), 354 pages, 110 figures.
- *Die Energiemengen der Bewegungen des Wassers in einem See mit besonderer Berücksichtigung des Malü-Sees*, Verh. int. Ver. theor. angew. Limnol. 2, 116 pages (1924).
- HANTZSCH, A., et VAGT, A., *Über den Zustand gelöster Stoffe auf Grund von Verteilungsversuchen*, Z. phys. Chemie 36, 705-742 (1901), 7 figures.
- HÄRRI, H., *Stratigraphie und Waldeschichte des Wauwilermooses und ihre Verknüpfung mit den vorgeschichtlichen Siedlungen*, Veröff. geobot. Inst. Rübel (Zurich 1940), n° 17, 104 pages.
- HEINEMANN, E., *Untersuchung über Trübungs- und Sedimentationsvorgänge in Gewässern*, Thèse, Albertus-Universität Königsberg (1936), 58 pages.
- HEINRICH, K., *Atmung und Assimilation im freien Wasser*, Int. Rev. Ges. Hydrobiol. Hydrogr. 30, 387-410 (1934).
- HESSLAND, IVAR, *Calcareous fresh-water sediments from northern Bohus län*, Arkiv Mineral. Geol. 1, n° 5, 103-167 (1949).
- HJULSTRÖM, F., *Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris*, Bull. Inst. University Upsala 25, 221 (1935).
- VAN HOOK, A., *The rate of adjustment of calcium bicarbonate solutions*, J. Geol. 45, 784-789 (1937), 2 figures.
- HUBAULT, E., *Les grands lacs subalpins de Savoie sont-ils alcalitrophes?* Arch. Hydrobiol. 40, 240-249 (1943), 8 tableaux.
- HUMMEL, K., *Über Sedimentbildung im Bodensee*, Z. dtsh. Ges. [B] 75, 154 (1923); Geol. Arch. 2, 35-45 (1923).

- JOHANSSON, S., *Die Festigkeit der Bodenarten bei verschiedenem Wassergehalt*, Sveriges geol. Undersökning [C], n° 256, Arsbock 7, n° 3, 1-110 (1914).
- JOHNSTON, J., et WILLIAMSON, E. D., *The rôle of inorganic agencies in the deposition of calcium carbonate*, J. Geol. 24, 729-750 (1916).
- JOUKOWSKY, E., et BUFFLE, J.-PH., *Lac de Genève. Constitution des sédiments*, Mém. Soc. Phys. Hist. nat. Genève 41, fasc. 4, 415-466 (1938).
- KAUFMANN, FR. J., *Beitr. Geol. Schweiz*, fasc. 11, 351-364 (1872).
- KINDLE, E. M., *A comparative study of different types of thermal stratification in lakes and their influence on the formation of marl*, J. Geol. 37, 150-157 (1929).
- KLÄHN, H., *Die Bedeutung geochemischer Vorgänge für die Bildung vadoser Süßwasserkalke*, Jb. Preuß. geol. Landesanstalt 45, 809 (1924).
- KOEHNE, W., *Grundwasserkunde*, 2° éd. (Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 1948), 314 pages.
- KOPP, CH., *Instrument pour mesurer l'évaporation de l'eau du lac*, Bull. Soc. neuchâteloise Sci. nat. 4, 16 (1858).
- *Les variations du niveau du lac de Neuchâtel pendant les années 1835-1856*, Mém. Soc. neuchâteloise Sci. nat. 4, 1-47 (1859), 4 tableaux, 5 planches.
 - *Sur l'évaporation du lac*, Bull. Soc. neuchâteloise Sci. nat. 5, 5-6 (1859-1861).
- KRIZENECKY, J., *Untersuchungen zur Frage einer quantitativen Bestimmung des Teichplanktons mittels Zentrifugieren*, Arch. Hydrobiol. 40, 98-113 (1943).
- KROGH, A., *On the tension of carbonic acid in natural waters and especially in the sea*, Medd. Grönland 26, 342-405 (1904).
- KÜHNEL HAGEN, S., *Bericht über die chemischen Arbeiten. Die Godthaabexpedition* (1928), Medd. Grönland 78, n° 2, 28 pages, 1 figure, 1 carte.
- LAMKE, K., *Physikalische Eignung deutscher limnischer und mariner Schlamme und Schlicke für Heilzwecke*, Geologie der Meere und Binnengewässer 3, 9-28 (1939).
- LECLERC, ED., *Eaux potables et eaux résiduaires* (Ed. Masson, Imprimerie H. Vaillant-Carmanne S.A., Liège 1945), 384 pages.
- LENZ, FR., *Schlammabschichtung in Binnenseen*, Naturw. 9, 225-230 (1921).
- *Quellkreide im Plöner See*, Verh. int. Ver. theor. angew. Limnol. 2 (1924) (cité par E. WASMUND, 1930, p. 111).
- LOZERON, H., *La répartition verticale du plancton dans le lac de Zurich de décembre 1900 à décembre 1901*, Arb. bot. Museum Eidg. Polytechn. (Zurich 1901) (cité par H. ROBERT, 1921, p. 113).
- LUNDQUIST, G., *Zur Mikroskopie der Binnenseensedimente*, Verh. int. Ver. theor. angew. Limnol. 9, 11-149 (1942).
- *Sjösediment och deras Bildningsmiljö*, Sveriges geol. Undersökning [C], n° 446, Arsbock 36, n° 3 (Stockholm 1942), 31 pages, 21 figures.
- LÜDI, W., *Das große Moos im westschweizerischen Seeland und die Geschichte seiner Entstehung*, Veröff. geobot. Inst. Rübel (Zurich 1935). 344 pages, 2 cartes, 3 profiles, 47 figures.
- *Die Hochwasserkatastrophe im westschweizerischen Seeland vom November/Dezember 1944*, Ber. geobot. Forschungsinst. Rübel in Zürich für das Jahr 1945, 107-123 (1946).
- MAUCHA, R., *Upon the influence of temperatur and intensity of light on the photosynthetic production of Nannoplankton*, Verh. int. Ver. theor. angew. Limnol. 2, 381 (1927).
- MAURER, J., *Die Verdunstung auf den Seen am Nordfuß der Alpen während der großen Hitze und Dürszeit 1911*, Meteorol. Z. 28, 545-555 (1911).

- MAURER, J., *Über die Verdunstung auf einzelnen Seen am nordalpinen Fuß*, Meteorol. Z. 30, 102–104 (1913).
- MERZ, E. L., *Vekselvirkningen mellem Geologi og Geoteknik*, Danmarks Geologiska Undersøgelse n° 29 (Copenhagen 1949).
- MICOLETSKY, H., *Zur Kenntnis des Faistenauer Hintersees bei Salzburg*, Int. Rev. Ges. Hydrobiol. Hydrogr. 3, 506 (1910).
- MINDER, L., *Über biogene Entkalkung im Zürichsee*, Verh. int. Ver. theor. angew. Limnol. 1, 20–32 (1923).
- *Biologisch-chemische Untersuchungen im Zürichsee*, Rev. Hydrol. (Aarau) 3, 1–70 (1926).
- *Der Zürichsee im Lichte der Seetypenlehre* (Fretz, Zürich 1943), 83 pages, 14 figures.
- MOHAMED, A. F., *Distribution of organic matter in sediments from the northern Red Sea*, Amer. J. Sci. 247, 116–127 (1948).
- MOHLER, H., *Der Einfluß von Kraftwerkbauten auf die Eigenschaften des Grundwassers*, Chimia 3, 129–145 (1949).
- MOLISCH, *Mikrochemie der Pflanzen* (Jena 1913).
- MÖLLER, L., *Ein Beitrag zur Frage der Wirkung der Windzirkulation auf die Physik und chemische Schichtung in einem See*, Verh. int. Ver. theor. angew. Limnol. 6, 201–216 (1933).
- MONARD, ALB., *La faune profonde du lac de Neuchâtel*, Bull. Soc. neuchâteloise Sci. nat. 44, 1–176 (1919).
- NIGGLI, P., et DE QUERVAIN, F., *Carte géotechnique de la Suisse* (Kümmerly & Frey, Berne 1934–1935, 1936–1938).
- NIPKOW, FR., *Vorläufige Mitteilungen über Untersuchungen des Schlammabsatzes im Zürichsee*, Rev. Hydrol. 1, 100–123 (1920).
- *Über das Verhalten der planktischen Kieselalgen im geschichteten Tiefenschlamm des Zürich- und Baldeggersees*, Rev. Hydrol. 4, 71–120 (1928).
- NÜMANN, W., *Die Leitfähigkeit des Calciumbicarbonates und die Bestimmung der Sulfate und Gesamthärte in natürlichen Gewässern mit Hilfe der elektrischen Leitfähigkeit*, Naturw. 24, fasc. 44, 693–696 (1936).
- PARDE, M., *Fleuves et rivières* (Colin, Paris 1941), 224 pages, 18 graphiques et cartes.
- PARÉJAS, ED., *L'épaisseur des varves dans le Haut lac de Genève*, 3^e Congrès du Rhône (Genève), p. 205–211 (1929).
- PERFILIER, A., *Zur Mikrobiologie der Bodenablagerungen*, Verh. int. Ver. theor. angew. Limnol. 4 (Rome 1923).
- PERRIN, J., *Les atomes* (Alcan, Paris 1939), 299 pages.
- PFEFFERKON, G., et WESTERMANN, H., *Ätzfiguren auf Kalkspat im submikroskopischen Gebiet*, N. Jb. Mineral. [A], Fasc. 5, 97–107 (1950).
- PIA, J., *Die rezenten Kalksteine*, Suppl. Z. Kristallogr., Mineral. Petrogr. [B] (Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1933), p. 1–418.
- QUARTIER, A., *Quelques points nouveaux concernant l'étude des lacs*, Bull. Soc. neuchâteloise Sci. nat. 53, fasc. 1, 47–58 (1947).
- *Le lac de Neuchâtel*, Mém. Soc. neuchâteloise Géogr. (Baconnière, Neuchâtel 1948), 164 pages.
- RAMANN, Z. dtsh. geol. Ges. 58, 174 (1906) (cité par J. PIA, 1933, p. 223).
- REITH, J. F., *Die Bestimmung der freien Kohlensäure in Trinkwässern*, Rec. Travaux chim. Pays-Bas 60, 474 (1941).

- RISLER et WALTER, *Analyse chimique du limon de quelques lacs suisses*, Bull. Soc. vaudoise Sci. nat. 14, 122 (1877).
- RITTER, M. G., *Projet d'alimentation de Paris et des localités environnantes au moyen d'une dérivation des eaux du lac de Neuchâtel*, Bull. Soc. neuchâtoise Sci. nat. 16, 155-166 (1888).
- RIVIER, O., *Recherche hydrologique sur le lac de Morat*, Bull. Soc. neuchâtoise Sci. nat. 61, 125-181 (1936), 16 graphiques, 5 figures, 2 planches.
- ROBERT, H., *Contribution à l'étude du Zooplancton du lac de Neuchâtel*, Bull. Soc. neuchâtoise Sci. nat. 45, 54-124 (1921).
- ROMIEUX, J., *Les carbonates dans les sédiments du lac de Genève*, Arch. Sci. phys. nat., 5^e période, 12, 202-206 et 244-254 (1930), 1 carte, 2 figures.
- RUTTNER, F., *Limnologische Studien an einigen Seen der Ostalpen*, Arch. Hydrobiol. 32, (1937) (cité par L. MINDER, 1943, p. 82).
- RUTTNER, F., et SAUBERER, F., *Durchsichtigkeit des Wassers und Plankton-Schichtung*, Rev. Hydrobiol. 37, 405 (1938).
- SAUBERER, F., et ECKEL, O., *Zur Methodik der Strahlungsmessungen unter Wasser*, Arch. Hydrobiol. 37, 257-289 (1936), 13 figures, 2 tableaux.
- SAUNDERS, J. T., et ULLYOT, P., *Thermo-electric apparatus for limnological research*, Rev. Hydrobiol. 34, 562 (1937).
- SCHARDT, H., *Sur des cristallisations de calcite dans les eaux souterraines*, Bull. Soc. neuchâtoise Sci. nat. 37, 158-170 (1910), 1 planche, 5 clichés.
- SCHMALZ, J., *Die Sauerstoff- und Härteverhältnisse des Wassers bei Tag- und Nachtuntersuchungen*, Rev. Hydrol. 6, 30-62 (1934).
- SCHMASSMANN, H., *Die theoretischen Grundlagen bei der Bestimmung und Berechnung von aggressiver CO_2Ca in natürlichen Wässern*, Schweiz. Arch. angew. Wiss. Technik 13, n° 9, 275-283 (1947).
- SCHMASSMANN, W., et SCHMASSMANN, H., *Chemische Untersuchungen im St. Moritzersee*, Rev. Hydrol. 10, fasc. 4, 23 (1948).
- SIMPSON, S. G., *A mixed indicator for Carbonate-Bicarbonate titrations*, Ind. Engin. Chemistry 16, n° 7, 709 (1924).
- SOLLBERGER, H., *Analyses d'eaux du lac de Neuchâtel*, Travaux Chimie alim. Hygiène 37, fasc. 1/2, 84-91 (1946).
- STANGENBERG, M., *Chemische Untersuchungen am Wigrysee*, Arch. Hydrobiol. Ichtyol. 9, 185-220 (1935).
- *Die chemische Zusammensetzung der Tiefensedimente in Seen des Szwaki-Gebietes*, Geologie der Meere und Binnengewässer 2, 391-418 (1938).
 - *Das Phosphorproblem bei der Bekämpfung der Verunreinigung von Oberflächengewässern*, Arch. Hydrobiol. 38, 148-154 (1941).
 - *Die Produktionsbedingung in den Teichen*, Geologie der Meere und Binnengewässer 6, 1-64 (1943), 9 figures.
- STENZ, EDW., *Sur la transmission de la radiation solaire dans les lacs de Wigry (Pologne)*, Arch. Hydrobiol. Ichtyol. 11, 1-23 (1938).
- STROM, K. M., *Production biology of temperate lakes*, Int. Rev. Hydrobiol. Hydrogr. 19, 329-348 (1928).
- STUNDL, K., *Limnologische Untersuchungen an einigen westfälischen Talsperren*, Arch. Hydrobiol. 38, 70-97 (1941).
- SVERDRUP, H. U., JOHNSTON, M. W., et FLEMING, R. H., *The oceans, their physics, chemistry and general biology* (Prentice-Hall, New York 1942), 1087 pages.

- TAPFER, E., *Meeresgeschichte der Kieler und Lübecker Bucht im Postglazial*, Geologie der Meere und Binnengewässer 4, 113–224 (1940).
- TERZAGHI, K. V., et FRÖHLICH, O. K., *Théorie du tassement des couches argileuses. (Introduction à la mécanique des argiles)*, Traduit de l'allemand par M. ADLER (Ed. Dunod, Paris 1939), 266 pages.
- THIENEMANN, A., *Die Gewässer Mitteleuropas*, in: *Handbuch für die gesamte Binnenfischerei Mitteleuropas* (Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 1923) (cité par L. MINDER, 1943, p. 29).
- THOMAS, E. A., *Fortschritte auf dem Gebiete der theoretischen und angewandten Limnologie während der Kriegsjahre*, Rev. Hydrol. 10, fasc. 2/3, 152 (1946).
- THUNMARK, SV., *Über regionale Limnologie von Südschweden*, Sveriges geol. Undersökning (Stockholm) [C] n° 410, Arsbok 31, n° 6 (1937).
- TROOST, L., et PÉCHARD, E., *Traité élémentaire de chimie* (Ed. Masson, Paris 1929), 906 pages, 546 figures.
- UETRECHT, ER., *Die Ablation der Rhone in ihrem Walliser Einzugsgebiete im Jahre 1904–1905*, Thèse (Berne 1906), 66 pages, 4 tableaux.
- UTTINGER, H., *Carte pluviométrique de la Suisse, 1:500 000*, Ass. suisse Aménagement Eaux (Zurich 1948).
- WASMUND, CH., *Sedimentationsgeschichte des Großen Jasmunder Bodens (Insel Rügen)*. Geologie der Meere und Binnengewässer 3, 506–526 (1939).
- WASMUND, E., *Lakustrische Unterwasserböden*, in: *Handbuch der Bodenlehre*, vol. 5 (Springer, Berlin 1930), p. 97–189, 33 figures.
- WATTENBERG, H., *Kohlensäure und Kalziumkarbonat im Meere*, Fortschr. Mineral. Kristallogr. Petrogr. 20, 168–195 (1936), 7 figures.
- *Die Bedeutung anorganischer Faktoren bei der Ablagerung von Kalziumkarbonat im Meere*. Geologie der Meere und Binnengewässer 1, 237–259 (1937).
- WEGMANN, EUG., *L'exploration des espaces intercontinentaux*, Bull. Soc. neuchâteloise Sci. nat. 73, 81–100 (1950), 1 figure.
- WELTEN, M., *Pollenanalytische stratigraphische und geochronologische Untersuchungen aus dem Faulenseemoos bei Spiez*, Veröff. geobotan. Inst. Rübel, fasc. 21 (Zurich 1944), 201 pages.
- WEREŠČAGIN, G. J., *Methoden der hydrochemischen Analyse in der limnologischen Praxis* (Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 1931), 230 pages, 117 références.
- WESENBERG-LUND, C., *Studier over økalk, Bønnemalm og Søgytje i danske ludsøer*, Medd. Dansk geol. Fov. (Copenhagen), n° 7–8, 1–180 (1901) (résumé en anglais).
- WISZNIEWSKI, J., *Recherches écologiques sur le Psammon*, Arch. Hydrobiol. Ichtyol. 8, 149–272 (1934).
- WYNGAERT, CH., *Microorganisme de nos eaux douces* (Rouge, Lausanne 1947), 162 pages.
- ZENDER, J., *L'eau et la vase*, Thèse (Genève 1908), 65 pages.
- ZEUNER, FR. E., *Dating the past (an introduction to Geochronology)* (Methnen & Co. Ltd., London 1946), 24 tableaux, 103 diagrammes.

